

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA SPEKTRA ZOBCOVÝCH FLÉTEN Z RŮZNÝCH MATERIÁLŮ I S DALŠÍMI ODLIŠNÝMI PARAMETRY

ANALYSIS OF THE SPECTRUM OF RECORDERS FROM DIFFERENT MATERIALS AND WITH OTHER
DIFFERENT PARAMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Kaplan

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Václav Kaplan

ID: 212559

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Analýza spektra zobcových fléten z různých materiálů i s dalšími odlišnými parametry

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Změřte a vyhodnoťte vybrané tóny hrané stejným hráčem na různé zobcové flétny. Vyhodnoťte i barvu generovanou v různé dynamice. Porovnejte spektra – zastoupení harmonických složek a jejich intenzitu i složek neharmonických. Identifikujte a porovnejte formantové oblasti. Provedte i komparaci směrového vyzařování nástrojů.

Změřte také mechanické vlastnosti píšťal: hmotnost, hustotu, tloušťku stěny, průměr i charakter (válec, kužel, exponenciála) vnitřní trubice, parametry hrany, průměr dírek pod prsty ad. a dejte do souvislosti mechanické vlastnosti nástroje s jejich barvou. Pomocí Besselových funkcí proveďte aproximaci, nakolik tvar vnitřní trubice ovlivňuje jakost spektra.

Výsledkem bude komparační tabulka, která mezi sebou porovná polohově stejné nástroje, ale zobcové flétny v odlišných polohách. Součástí vyhodnocení bude i nalezení relací mezi mechanickými vlastnostmi a jakostí spektra.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Syrový, V.: Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

[2] FLETCHER, N. H., ROSSING, T. D, The Physics of Musical Instrument, Springer-Verlag New York, New York: 1998, ISBN 978-1-4419-3120-7

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V této práci jsou zkoumány jevy a vlastnosti, které ovlivňují samotný vznik tónu v zobcové flétně a také následný charakter frekvenčního spektra. Patří sem rozměry, materiál a mechanické vlastnosti. Je hodnoceno několik sopránových a několik altových fléten. Výzkum je obohacen o práci s vlastnoručně vyrobenými válcovými vzorky a krátké porovnání tří exotických fléten. Závěrem je srovnávací tabulka a závěrečné shrnutí.

Klíčová slova

Zobcová flétna, Barva, Frekvenční spektrum, Vzdušný sloupec, Mechanické vlastnosti a rozměry.

Abstract

This thesis research focuses on the phenomena and the properties that affect the very origin of the tone in the recorder and the subsequent character of the frequency spectrum. These include the dimensions, material and mechanical properties. There are several soprano and alto recorders measured in this thesis. The research is enriched by working with hand-made cylindrical samples and a brief comparison of three exotic flutes. The conclusion is a comparison table and the final summary.

Keywords

Recorder, Timbre, Frequency spectrum, Air column, Mechanical properties and dimensions.

Bibliografická citace

KAPLAN, Václav. *Analýza spektra zobcových fléten z různých materiálů i s dalšími odlišnými parametry*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133485>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Václav Kaplan*

VUT ID studenta: *212559*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2020/21*

Téma závěrečné práce:
Analýza spektra zobcových fléten z různých materiálů i s dalšími odlišnými parametry.

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Moc rád bych poděkoval panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení této práce, trpělivost a za každou poskytnutou konzultaci. Dále děkuji MgA. Martině Komínkové za nahrání audio vzorků zobcových fléten a za všeobecnou pomoc.

V Brně dne:

podpis autora

OBSAH

1. CÍLE A OBSAH PRÁCE	3
2. ZOBCOVÁ FLÉTNÁ.....	4
2.1 O NÁSTROJI	4
2.2 STRUKTURA ZOBCOVÉ FLÉTNY	4
2.3 HISTORIE	6
3. TEORETICKÝ ÚVOD	7
3.1 VLNĚNÍ V TRUBICI	7
3.1.1 Mezní frekvence a korekce na otvor	8
3.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU	9
3.3 ZOBCOVÁ FLÉTNÁ – RETNÁ PÍŠŤALA	10
3.4 REALIZACE VÝPOČTŮ V PROGRAMU MATLAB (METODY MĚŘENÍ).....	11
4. VÁLCOVÉ VZORKY	13
4.1 TRUBICE	13
4.1.1 Rozměry.....	14
4.1.2 Srovnání podle typu trubice	15
4.1.3 Vzduchový otvor v polovině.....	17
4.1.4 Srovnání podle menzury	18
4.1.5 Vlastnosti materiálu	20
5. ANALÝZA ZOBCOVÝCH FLÉTEN	24
5.1.1 Přehled měřených fléten.....	24
5.1.2 Dřeviny.....	25
5.2 ALTOVÉ FLÉTNY	25
5.2.1 Rozměry.....	25
5.2.2 Tón f^1	26
5.2.3 Analýza formantů v dalších tónech.....	28
5.2.4 Vliv prstokladů	29
5.2.5 Tón g^2	31
5.2.6 Posílení druhé harmonické složky	32
5.3 SOPRÁNOVÉ FLÉTNY.....	34
5.3.1 Dřevěné	34
5.3.2 Plastové	36
6. EXOTICKÉ FLÉTNY	38
6.1.1 Spektra základních tónů	39
6.1.2 Spektra	40
7. ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ.....	42
7.1 SROVNÁVACÍ TABULKY	45
LITERATURA	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. č. 2.1 - Anatomie flétny	5
obr. č. 3.1 - Vlna fundamentu v otevřené trubici znázorněna příčnými kmity tlaku. Převzato z [3].	8
obr. č. 3.2 - Ukázka kódu z programu MATLAB - Výpočet FFT.....	11
obr. č. 3.3 - Ukázka kódu z programu MATLAB - Vytvoření okna.	12
obr. č. 3.4 - Ukázka kódu z programu MATLAB - LPC.....	12
obr. č. 4.1 - Experimentální vzorky válcových trubice.	13
obr. č. 4.2 - Náčrt trubice a rozměry.	14
obr. č. 4.3 - Pro simulaci polouzavřené trubice byl zakrytý otvor, který je blízky otvoru kterým se vhnání vzduch.	16
obr. č. 4.4 - Závislost mezní frekvence na velikosti menzury.	20
obr. č. 5.1 - Prstoklady tónu f^1 , a^1 , c^2 , e^2 , g^2 , a^2 jdoucích zleva doprava.	29
obr. č. 5.2 - Prstoklad tónu b^1	32
obr. č. 5.3 - Prstoklad pro tón g^2 u sopránové zobc. flétny.....	35
obr. č. 7.1 - Spektrum tónu hraného na zobcovou flétnu (s kónickým vrtáním).	42
obr. č. 7.2 - Znázornění posilování spektra rezonancí materiálu. Rezonance materiálu (modře) a spektrum (černě).....	43

SEZNAM TABULEK

Tabulka.3.1 - Tabulka vztahů pro okrajové podmínky různých typů trubice, kde c je rychlost šíření zvuku, l je délka vzdušného válce, n je celočíselný násobek a fn – je frekvence módu odpovídající n	7
Tabulka 4.1 - Rozměry experimentálních vzorků.	13
Tabulka 4.2 – Tabulka rozměrů plastových vzorků.	14
Tabulka 4.3 -Naměřené hodnoty módů jednotlivých vzorků podle typu trubice.	15
Tabulka 4.4 - Porovnání naměřených rezonančních frekvencí otevřené trubice s výpočtem.....	15
Tabulka 4.5 - Porovnání naměřených a spočítaných hodnot rezonančních frekvencí, při vytváření tónu uprostřed trubice.	17
Tabulka 4.6 - Vlastnosti materiálů zjištěné z katalogů.....	20
Tabulka 4.7 - Tabulka spočítaných akustických konstant.	21
Tabulka 5.1 - Seznam měřených zobcových fléten.	24
Tabulka 5.2 - Rozměry altových fléten v milimetrech.	26
Tabulka 5.3 - Materiálové vlastnosti sopránových fléten.	34
Tabulka 6.1 - Seznam měřených fléten v této kapitole.	38
Tabulka 6.2 - Spočítané hodnoty hustoty a akustické konstanty ze změřených rozměrů.....	38
Tabulka 6.3 - Tabulka délek vzdušného sloupce pro tóny G u jednotlivých nástrojů.....	39
Tabulka 6.4 - Tabulka vypočítaných harmonických frekvencí pro jednotlivé flétny. Pro panovu flétnu jako polouzavřená trubice a pro indické flétny jako otevřená trubice.	40
Tabulka 7.1 - Srovnání ak. konstant všech materiálů.....	43
Tabulka 7.2 - Srovnávací tabulka.....	46
Tabulka 7.3 - Tabulka fléten.	47

1. CÍLE A OBSAH PRÁCE

Cílem práce je analyzovat frekvenční spektra více druhů fléten v souvislosti s jejich mechanickými vlastnostmi:

- Materiál
- Rozměry (vzdušný válec, velikost děr)
- Charakter vnitřního vrtání
- Ostatní (ostrost hran apod.)

Definovat do jaké míry a v jaké oblasti tyto prvky ovlivňují barvu a spektrum jednotlivých zobcových fléten.

K dispozici pro tuto práci jsou nahrané vzorky v několika polohách různých zobcových fléten, které nahrála profesionální hráčka. Zároveň jsou v práci porovnávány i jiné vzorky, nahrané na různé nástroje a dokonce i na vyrobené experimentální trubice. Výhodou těchto dalších vzorků je, že nástroje, na které byly nahrány, byly při práci fyzicky k dispozici. Všechny tyto vzorky budou navzájem porovnávány a zkoumány a snahou bude dát vlivy jejich rozdílných vlastností do souvislostí.

Nedílnou součástí této práce je spektrální analýza audio vzorků, která je prováděna v programu Matlab, a následné zpracovávání vypočítaných dat do spektrografů, které je prováděno v programu Microsoft Excel.

Výsledkem této práce je srovnávací tabulka, která obsahuje souhrn všech prvků a vlivů, jenž byly v průběhu práce zohledněny a zkoumány.

2. ZOBCOVÁ FLÉTNA

2.1 O nástroji

Hudební nástroj zobcová flétna patří do skupiny dřevěných dechových nástrojů. Vyrábí se ze dřeva nebo různých plastových materiálů.

Vznik tónu funguje na principu turbulentních vlnění vzniklých rozražením proudu vzduchu usměrněného na ostrou hranu. Tímto se flétna velmi podobá varhanním retným píšťálám, které fungují na stejném principu. Retná hrana je právě ta hrana, o kterou se proud vzduchu rozráží. Vzniklý tón je poté především závislý na délce vzdušného sloupce, který je rozvibrován vzniklým tónem na hraně. Zobcová flétna je v podstatě varhaní píšťala, jež má v sobě otvory, kterými se dá zkracovat délka vzdušného sloupce a tedy zvyšovat (zkracovat sloupec) či snižovat (prodlužovat sloupec) tón. Dále je tón závislý na tvaru vnitřní dutiny, který ovlivňuje výslednou barvu (válcová dutina, kuželová dutina).

Ladění zobcové flétny je nejčastěji v C. To znamená, že když jsou zacpány všechny otvory na nástroji a zahrajeme tón, tak zazní právě tón C v určité oktávě. V jaké poloze záleží na druhu zobcové flétny. Sopranová začíná na tónu c^2 (psané c^1). Například tenorová flétna poté začíná o oktávu níže. Další typické ladění je v F (z historických pak také v G, nebo A).

Vznik názvu pochází z tvaru vrchní části nástroje, tedy zobce, kterým se do flétny vhání vzduch – zobcová flétna. Dále se můžeme setkat s názvem „flauto dolce“, jenž je odvozen od toho, jak nástroj zní – flauto dolce = „líbezná flétna“.

Anglický název "the Recorder" je starší a je převzat z názvu ptáka, který si něco pamatuje – recorder. Na flétnu se totiž také přehrávaly jednoduché melodie, které si někteří ptáci uměli zapamatovat a opakovali je. V této spojitosti vznikly i názvy audio-recorder nebo video-recorder. [1]

2.2 Struktura zobcové flétny

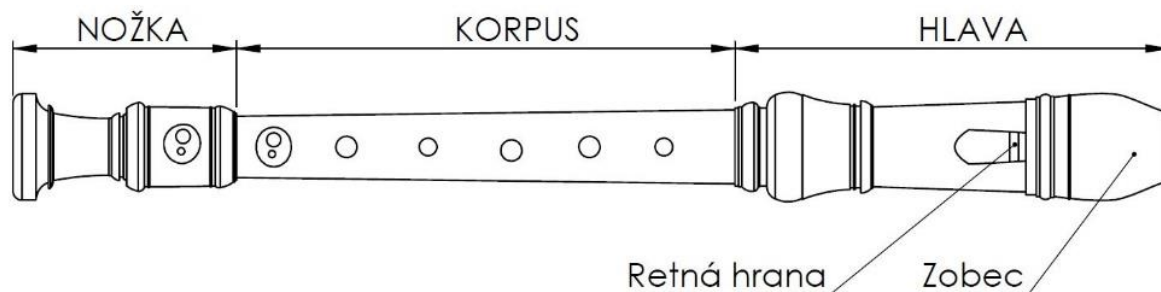
Jakou má flétna anatomii, záleží na její velikosti a na tom, o jaký typ flétny se jedná. Pro úplně nejmenší druhy je běžné, že jsou vyrobeny ze dvou nebo klidně pouze z jednoho kusu dřeva či plastu. Pro nejtradičnější sopranovou flétnu nejčastěji platí, že se skládá ze tří kusů, které se jmenují hlavice, tělo (korpus) a nožka.

V základním rozdělení se flétny dělí ještě na tzv. barokní a německý systém. Ten se liší vizuálně pouze v tom, že u barokního systému je třetí dírka od spodu největší dírkou na nástroji. U německého systému je tomu naopak a tato dírka je zde nejmenší. Další větší rozdíl mezi

těmito systémy je v odlišných hmatech. Německý systém je vlastně barokní flétna upravená takovým způsobem, aby tónově stoupala a zněla při postupném odkrývání jednotlivých otvorů, přičemž u barokního systému se používají tzv. vidličkové hmaty. [1]

Zobcová flétna zní o oktávu výše, než je psaná. Když je zahrán tón, který je v notách pro sopránovou zobcovou flétnu napsaný jako $c^1 = 261$ Hz (v houslovém klíči je to nota na první pomocné lince pod notovou osnovou), ve spektrografu tohoto tónu by bylo vidět, že fundament je na frekvenci okolo 520 Hz. Tato frekvence odpovídá tónu c^2 o oktávu výše. Výška tónu je velice závislá na intenzitě vháněného vzduchu do flétny. [1] [2]

Přefouknutí: Zvuk ve flétně vzniká prouděním vzduchu určitou rychlostí kolem ostré hrany. Výška tónu, který vydává samotná hrana, je závislá na rychlosti (druhé odmocnině tlaku vzduchu). Při slabém foukání do nástroje je slyšet pouze zvuk utvářející se na hraně. Při větším tlaku vháněného vzduchu se frekvence tohoto zvuku zvedá, dokud se nástroj nerozezní. To znamená, že třetí tón dosáhl rezonanční frekvence prvního módu. Vzniklý tón v rezonátoru už není tak frekvenčně závislý na tlaku vzduchu, ale frekvence tónu na hraně s tlakem stále roste, a pokud dosáhne dalšího rezonančního módu, nastane přefouknutí. Tón se skokově přeladí „o jednu harmonickou“.



obr. č. 2.1 - Anatomie flétny

Na obrázku č. 2.1 je nakreslená sopránová zobcová flétna. Jsou zde její tři části. V první části s názvem hlava, se nachází vzduchový kanálek schovaný v zobci, kterým se vhání vzduch do flétny. Proud vzduchu naráží na retnou hranu, tento podélný otvor s hranou se nazývá také labium (ústa). Střední díl, neboli korpus, je většinou kuželovitého (pyramidálního) tvaru, ale i čistě válcového. Nachází se na něm tónové otvory. Třetím dílem je nožka, která má na sobě u například sopránových či altových fléten často ještě poslední otvor. Na její spodní hraně je otevřený konec nástroje. Občas nebývá nožka samostatnou částí a flétna se skládá pouze z těla a hlavy.

2.3 Historie

Co se týče dechových nástrojů, tak píšťaly a flétny patří do nejstarší skupiny nástrojů v historii lidstva. Podle archeologických výzkumů lze najít různé píšťalky až v paleolitu, tedy starší době kamenné. Takovéto nástroje se nejčastěji vyráběly z bambusu, dutých dřevin, ale i kostí. [3]

Co se týče přímo zobcových fléten, tak nejstarší dochovaná zobcová flétna je datována na konec 15. století. Pro ještě starší, středověké flétny lze čerpat pouze z obrazů. To nejstarší vyobrazení zobcové flétny je z roku 1020 n.l. a lze ho najít v Německu v Hildesheimu.

Celá rodina fléten (bass – soprán) vznikla v období renesance, kde se flétny vyráběly v několika velikostech, aby mohly zastoupit jakýkoliv hlas. Renesanční flétna byla klasicky válcového vrtání a z jednoho kusu dřeva. Její barva byla díky tomu velmi dutá.

Zobcová flétna dozajista dostala své největší popularity v době vrcholného baroka. V tomto období vzniklo tzv. zužující se vrtání (větší rozsah a pestřejší barva) a poslední dvě dvojité dírky (další půltóny).

Od konce 18. století, kdy nabyl znovu zájem o starší nástroje, jako například cembalo, loutna anebo právě zobcová flétna, se vývoj a výroba tohoto nástroje stala velmi populární a na trhu lze najít nespočet druhů lišící se jak tvarem, tak materiálem. Ty nejpopulárnější modely, na které se učí nejčastěji například i děti v základních uměleckých školách mají svůj základ v původním barokním modelu.

V oblasti soudobé hudby je zobcová flétna plnohodnotným nástrojem, její menší dynamické rozpětí lze vyrovnat amplifikací. Většímu rozšíření soudobé tvorby pro zobcovou flétnu často brání spíše nedostatek hráčů s dostatečnými technickými schopnostmi. Mezi pokročilé techniky, které je zkušený hráč schopen provést, patří mj. glissanda (postupným a plynulým odkrýváním otvorů), štěpné tóny (přefouknutím standardních i speciálních prstokladů), mikrointervalová hra... Krom toho lze ze zobcových fléten vyloudit různé hvízdavé a cvrlikavé zvuky postupným zakrýváním labia, lze užívat extrémní artikulaci (sputato, frullato), přefukovat hlubší tóny do složitých „vícezvků“ připomínajících zvuk fujary atd. [3]

3. TEORETICKÝ ÚVOD

3.1 Vlnění v trubici

K odrazu vlny v uzavřené trubici dochází na každé překážce, každém rozšíření nebo na konci trubice. [2] Tím, že se vlna v trubici odráží od jednoho konce a sčítá se s vlnou, která se odrazila od protilehlého konce a šíří se v protisměru, vzniká stojaté vlnění. Touto interferencí se může určitý kmitočet buď posílit, nebo zeslabit. Vlny mohou být buď v proti fázi (odečtení), nebo ve fázi (sečtení). Charakter putující vlny určuje především stav na okrajích trubice. Bylo již řečeno, že vlna se v trubici odráží i na změně jejího průměru (rozšíření, zúžení). Konec trubice lze považovat za rozšíření do nekonečného průměru, pokud není na okraji flétna nijak ucpána. Pokud je okraj uzavřený, vlna se pochopitelně odráží od ucpávky. Tyto faktory se nazývají okrajové podmínky.

Otevřený konec – Vlnění zde neomezuje žádná pevná překážka. Akustická rychlost není ničím zpomalena a vykazuje maximum (kmitna) a akustický tlak je naopak minimální (uzel). Vlna základní frekvence tónu (fundamentu) v trubici na obou koncích otevřené je ve vzdušném sloupci obsažena pouze z jedné poloviny.

Uzavřená trubice – Vlna zde narazí na uzavřený pevný konec a akustická rychlost je zpomalena a vykazuje minimum (uzel) a akustický tlak je naopak maximální (kmitna). Vlna základní frekvence tónu v trubici na jednom konci uzavřené je ve vzdušném sloupci obsažena pouze z jedné čtvrtiny.

Při odrazu na uzavřeném konci se až na část vlny, která se pohltila v materiálu, vrací energie zpět do nástroje. [4] Na otevřeném konci unikne mnohem víc energie pryč z nástroje. To jaké množství se neodrazí zpět, záleží na poměru vlnové délky a velikosti okrajového otvoru. Logicky čím větší je otvor, tím více energie unikne. Z toho tedy plyne i úvaha, že čím větší je průměr nástroje, tím více ubývá vyšších harmonických na intenzitě ve spektru.

TYP TRUBICE	FREKVENCE
Válec – otevřená	$f_n = n \frac{c}{2l}$
Válec – polouzavřená	$f_n = (2n - 1) \frac{c}{4l}$
Kužel – otevřená	$f_n = n \frac{c}{2l} \left(1 - \frac{x_0}{l}\right)$

Tabulka.3.1 - Tabulka vztahů pro okrajové podmínky různých typů trubice, kde c je rychlost šíření zvuku, l je délka vzdušného válce, n je celočíselný násobek a f_n – je frekvence módu odpovídající n . [2]

Vzorce z tabulky 3.1 vycházejí z jednoduchého vztahu pro výpočet vlnové délky.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Kde λ je vlnová délka. Fundament frekvence tónu znějícího v trubici je, jak už bylo řečeno, pouze jedna „půlvlna“ celkové vlnové délky.



obr. č. 3.1 - Vlna fundamentu v otevřené trubici znázorněna příčnými kmity tlaku. Převzato z [2].

Vlnová délka takové frekvence je potom dvakrát delší, než je délka trubice. Nahradíme tedy vlnovou délku délkou trubice.

$$2l = \frac{c}{f}$$

Vyjádříme frekvenci a přidáme násobitel odpovídající vyšším harmonickým složkám. Pro otevřenou válcovou trubici jsou to všechny celočíselné násobky základní frekvence.

$$f_n = n \cdot \frac{c}{2l}$$

n – celé číslo odpovídající pořadí vyšší harmonické frekvence ve spektru. Pro fundament $n = 1$. l – Délka trubice (vzdušného válce).

3.1.1 Mezní frekvence a korekce na otvor

Mezní frekvence f_m - odděluje pásmo podélných kmitů od neharmonického šumového pásma příčných kmitů. U jednoduchých válcových sloupců je vypočítána pomocí vztahu pro frekvenci odpovídající určité vlnové délce, která odpovídá průměru válce.

$$f_m = \frac{c}{2d}$$

d – vnitřní válcové dutiny

Délková korekce na otvor

Při reálném průměru trubice je dále nutné uvážit, že funkční délka l_a kmitajícího vzduchového sloupce je delší o tzv. délkovou korekci K . [5] Reálná délka trubice l_R je pak s touto korekcí sečtena. Tuto novou hodnotu nazveme akustická délka a označíme l_a .

$$l_a = l_R + K$$

3.2 Mechanické vlastnosti materiálu

Tón a jeho následná barva se podle přechozí kapitoly tvoří kmitáním vzduchu v prostoru uvnitř trubice, ale další podíl na výsledném spektru má vliv materiálu nástroje. Kmity vzniklé ve vzdušném válci mohou přejít na tělo nástroje, které následně rezonuje a posiluje spektrum. Jak hodně je schopen materiál rezonovat, je ovlivněno především hustotou materiálu a jeho pružností.

Schopnost materiálu rezonovat by se dala popsat jako schopnost vyzařovat energii vlnění do okolí. S touto schopností úzce souvisí tzv. Konstanta vyzařování (akustická konstanta). Část energie je pohlcena vnitřním třením a část je vyzářena do okolí jako zvuková energie. Tyto popsané vlastnosti se nazývají rezonanční vlastnosti materiálu.

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad [N \cdot m \cdot kg^{-1}]$$

K_A – Konstanta vyzařování (akustická konstanta), E – modul pružnosti, ρ – hustota, N – Newton, m – metr, kg – kilogram.

Hodnota akustické konstanty závisí na dříve uvedených vlastnostech materiálu, tedy na pružnosti a hustotě. Čím větší akustická konstanta, tím více energie je schopen materiál vyzařovat do okolí. Akustická konstanta rezonančního smrku, který má výborné rezonanční vlastnosti se pohybuje okolo $K_A = 12$.

Hustota je tedy objemová hmotnost materiálu a modul pružnosti by se dal popsat jako odpor materiálu vůči pružné deformaci.

„Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformace.“ [6]

Je důležité si také uvědomit, že pokud se jedná o anizotropní materiál, tak i modul pružnosti bude mít v každé ose jiné vlastnosti. Ve výsledku je definován jako poměr napětí ku poměrnému prodloužení, které tímto napětím (deformací) vzniklo. Tento vztah se nazývá Hookův zákon.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

σ – napětí, ε – poměrné prodloužení

Poměrné prodloužení je poměr prodloužení při deformaci vůči původní hodnotě délky. S touto problematikou souvisí ještě pojem mez pružnosti. To je hodnota napětí, která pokud je v určitém směru přesažena, tak už se materiál nevrátí po ustání namáhání do původního stavu. [7]

3.3 Zobcová flétna – Retná píšťala

Zobcová flétna funguje na principu retné píšťaly. Vzduch vháněný malou štěrbínou do prostoru úst píšťaly (u zobcové flétny labium). Zde vzniká třetí tón. Ten je rozdělený na dva. Štěrbínový tón vzniká při výstupu vzduchu ze šterbiny. Druhým důležitějším tónem je tón hranový, který je vytvořen při dopadu vzduchu na retnou hranu, kde se roztříští na dvě turbulentní vlnění nad a pod hranou. Vlnění pod hranou navazuje na vzdušný sloupec, tedy na rezonátor.

V literatuře se lze dočíst, že existence hranového tónu není tak jednoduchá. Lze si tento proud vzduchu představit jako takový jazýček, který se na retné hraně rozděluje na dva. V návaznosti na rezonátor (vzdušný sloupec), přesněji na momentální stav výchylky zvukové vlny v místě úst píšťaly, je ovšem tento jazýček vychylován dovnitř a ven. Vzniká tzv. kmitající vzdušný jazýček.

Kmitající vzdušný jazýček v ústech píšťaly je oscilátorem, jehož kmity zesiluje rezonátor – vzdušný sloupec. Pohyb jazýčku je velmi složitý a lze jej z části připodobnit k pohybu pístu. [4]

Vznik tónu v retné píšťale:

1. Vzduch projde štěrbínou a hned za ní nejdříve vzniká štěrbínový tón.
2. Proud vzduchu dopadá na hranu a rozdvíjí se. Vznik hranového tónu.
3. Vznik postupné vlny šířící se vzdušným sloupem směrem k otevřenému konci.
4. Na otevřeném konci se vlna odráží ve fázi a výchylka zde vykazuje kmitnu (tlakový uzel). Kmitna rychlosti se vytváří jak na otevřeném konci, tak v ústech píšťaly, protože zde nevzniká mechanická překážka.
5. Odražená vlna se uprostřed dutiny sráží s další přímou vlnou, která postupuje od úst. Zde rychlost klesá na minimum a vykazuje uzel. Sražené vlny vytvoří mezi sebou tlak (tlaková kmitna). Vznik stojatého vlnění.

Také vzniká výše zmíněné kmitání jazýčku, který následkem vracející se vlny je vychylován vně píšťaly. Dle uvedeného postupu vzniku tónu je na otevřeném konci i v ústech píšťaly maximální výchylka rychlosti. To odpovídá schématu otevřené trubice (obr. 3.1). **Zobcová flétna sice má tvar polouzavřené trubice, ale labium neboli ústa se chovají spíše jako otevřený konec.** Vznik prvních 3-5 harmonických je silně závislý na menzuraci labia a vnitřním vrtání nástroje a také na intenzitě vhánění vzduchu. Tato část spektra může vykazovat jak lichý, sudý, tak i komplexní charakter.

3.4 Realizace výpočtů v programu MATLAB (metody měření)

Pro získání spektra určitého tónu je nejdříve nutné nahrát vybrané tóny pomocí mikrofону. Pro nahrávání (například vzorků trubic a některých fléten) byl použit kondenzátorový kardiodní mikrofon Aston Origin. Do DAW softwaru byly nahrány vybrané tóny.

Tóny jsou nastříhány a vyexportovány do úseků. Pokud je vzorkovací frekvence 48 kHz a signál trvá 1s, tak je poměr vzorkovací frekvence k celkovému počtu vzorků roven 1.

Pro vykreslení frekvenčního spektra pomocí matlabu byly načteny data z audio souboru a byla provedena Fourierova transformace a optimalizace osy.

Načtení dat z audiosouboru bylo provedeno pomocí příkazu `audioread`. Tento příkaz z audio souboru načte hodnotu vzorkovací frekvence a řetězec dat odpovídající hodnotám amplitudy od -1 do 1 každého vzorku v čase. Ještě je potřeba nadefinovat délku signálu, respektive počet všech vzorků N .

Pro Fourierovu transformaci lze v Matlabu použít integrovanou funkci `fft`. Pokud vypočítáme `fft` na celé délce N , vznikne zrcadlová funkce. Výsledná délka signálu bude $N/2$. Osa x je takto stále ve vzorcích odpovídající jejich úrovni. Pro převedení vzorků na odpovídající frekvenci je nutné vynásobit jednotlivé vzorky poměrem vzorkovací frekvence a celkovým počtem vzorků. [8]

$$f_x = \frac{f_s}{N} \cdot N_x$$

f_x - frekvence na určitém bodě osy x (v kódu = xf), f_s - vzorkovací frekvence audiosignálu, N - celkový počet vzorků v audiosignálu (v kódu = No), N_x - určitý vzorek na ose x (v kódu = $xsamples$).

```
S_magn=abs(fft(SignalOkenko)); %zrdcadlová fft
xsamples=[0:No-1]; %posunutí osy do nuly
No2 = ceil(No/2); %odstraneni druhe strany spektra
xf=fs/No*xsamples; %převod samplů na hz
ydb=20*log10(S_magn(1:No2)); %prepocet y na dB
xfopt=20000; %cejchovani na 20kHz
Nopt=ceil((xfopt*No)/fs);
```

obr. č. 3.2 - Ukázka kódu z programu MATLAB - Výpočet FFT.

Jak už bylo zmíněno, pokud je celková doba signálu rovna jedné sekundě, tak je poměr vzorkovací frekvence a počtu vzorků roven jedné. Pak platí:

$$f_x = N_x$$

Pokud je doba trvání půl sekundy, tak:

$$f_x = 2 \cdot N_x$$

Osu y je potřeba převést na hladinu v decibelech pomocí výkonového logaritmu, kde za U bude dosazena amplituda vzorků ze signálu.

$$L = 20 \log(U)$$

Aby graf byl vykreslován pouze do kmitočtu 20 kHz, tak je potřeba zjistit jakému vzorku odpovídá požadovaný kmitočet. Z rovnice pro převod vzorků na frekvenci je vyjádřena hodnota Nx a řetězec hodnot je omezen na vrchní hranici Nx .

FFT nebyla ovšem prováděna na celé délce signálu, ale bylo z něho vytvořeno okénko o délce 100ms. Z tohoto okénka je až následně vypočítána FFT. Podle předchozího pravidla je tedy platí: $f_x = 10 \cdot N_x$

```
%VYTVORENI OKENKA
Nc=length(signal);           %diskretni delka sig
T=1000;                      %delka celeho signalu v milisekundach
Tpre=110;                    %cas po kterem zacne okenko [ms]
N1=ceil((Nc/T)*Tpre);        %zacatek okenka
To=100;                      %delka okenka [ms]
No=ceil((Nc/T)*To);          %pocet samplu v okenku
N2=N1+No-1;                  %konecny sample okenka

SignalOkenko=signal(N1:N2);
```

obr. č. 3.3 - Ukázka kódu z programu MATLAB - Vytvoření okna.

Pro analýzu formantových oblastí je použita integrovaná funkce *lpc* programu MATLAB, která funguje na autokorelačním principu. Pomocí funkce *freqz* je pak z koeficientů vytvořena spektrální charakteristika vybraného vzorku. [5]

```
n=length(SignalOkenko);
koef=lpc(SignalOkenko,10);
[h,fa]=freqz(1,koef,n/2,fs);
hopt=20*log10(abs(h));
```

obr. č. 3.4 - Ukázka kódu z programu MATLAB - LPC.

4. VÁLCOVÉ VZORKY

V této kapitole budou porovnány vlivy mechanických vlastností tří různých experimentálních vzorků trubic vyrobených z trubek používaných na vodovodní potrubí ve stavebnictví. Tyto vzorky mají různé mechanické vlastnosti např.: tloušťku stěny nebo menzuru.

4.1 Trubice



obr. č. 4.1 - Experimentální vzorky válcových trubic.

Trubice mají stejnou délku, ale rozdílné tloušťky stěn, materiál a menzury. Záměrem je mít stejně dlouhé vzorky, tedy stejnou výšku vzdušného sloupce a sledovat rozdíly ve frekvenčních spektrech při soustředění se na různé mechanické vlastnosti.

Název vzorku	Délka [mm]	Průměr [mm]	Tloušťka [mm]
Trubice 1	289,5	50	2
Trubice 2	290,5	40	2
Trubice 3	289,5	40	7

Tabulka 4.1 - Rozměry experimentálních vzorků.

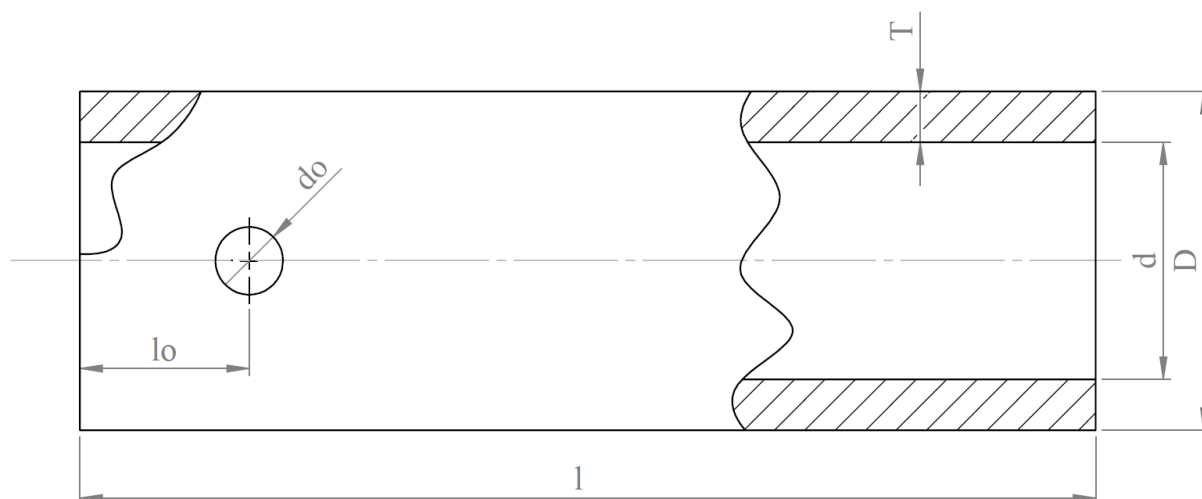
V trubicích je vyvrtaný otvor cca 25mm od kraje. Tento otvor má zaostřenou hranu. Zvuk je vytvářen ústy, kterými je vháněn proud vzduchu na ostrou hranu otvoru. Proud vzduchu vytváří turbulentní vlnění, které rozechvívá vzduch v dutině.

4.1.1 Rozměry

Rozměry v tabulce 4.2 jsou znázorněny na obrázku 4.2 níže. V tabulce jsou dále uvedeny obsahy pro vnější průměr $D \rightarrow S_D$ a pro vnitřní průměr $d \rightarrow S_d$. Na posledním řádku je hmotnost m .

Rozměr	Trubice 1	Trubice 2	Trubice 3
$D[mm]$	50	40	40
$d[mm]$	46	36	26
$l[mm]$	289,5	290,5	289,5
$l_o[mm]$	26	28	28
$d_o[mm]$	8	9	8
$T[mm]$	2	2	7
$S_d[mm^2]$	1661,9	1017,9	530,9
$S_D[mm^2]$	1963,5	1256,6	1256,6
$m[g]$		60	188

Tabulka 4.2 – Tabulka rozměrů plastových vzorků.



obr. č. 4.2 - Náčrt trubice a rozměry.

4.1.2 Srovnání podle typu trubice

TRUBICE 1						
TYP	n	1	2	3	4	5
OTEVŘENÁ	$f[Hz]$	550	1140	1660	2190	
	$L[dB]$	22,57	-0,06	-11,62	-21,62	
POLOUZAV.	$f[Hz]$	400	900	1450	2000	2560
	$L[dB]$	53,26	28,22	19,86	11,75	-0,01
TRUBICE 2						
TYP	n	1	2	3	4	5
OTEVŘENÁ	$f[Hz]$	570	1140	1690	2270	
	$L[dB]$	36,41	14,91	8,66	3,12	
POLOUZAV.	$f[Hz]$	460	930	1460	2050	
	$L[dB]$	49,12	32,53	28,43	12,24	
TRUBICE 3						
TYP	n	1	2	3	4	5
OTEVŘENÁ	$f[Hz]$	580	1150	1740	2290	
	$L[dB]$	47,69	21,55	14,82	11,92	
POLOUZAV.	$f[Hz]$	470	930	1480	2030	
	$L[dB]$	49,40	41,93	24,17	13,22	

Tabulka 4.3 - Naměřené hodnoty módů jednotlivých vzorků podle typu trubice.

Vznik zvuku v trubici není tak jednoduchý, jak se na první pohled může zdát. Ačkoliv se jedná o válcové trubice, záleží zde stále na mnoha aspektech, které ovlivňují výšku tónu barvu a celkový charakter zvuku, který „nástroj“ vydá.

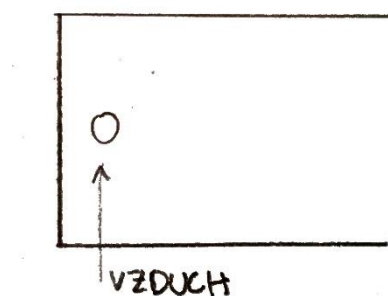
Otevřená trubice vykazuje průběh dle očekávání. Spektrum má jak liché tak sudé složky. Srovnáme vypočítané hodnoty podle vzorce pro otevřenou trubici s naměřenými hodnotami. Výpočet je pro $l = 289.5mm$ a pro $c = 343m/s$.

TYP	n	1	2	3	4
$f_n = n \frac{c}{2l}$	$f[Hz]$	592	1184	1777	2369
Trubice 1	$f[Hz]$	550	1140	1660	2190
Trubice 2	$f[Hz]$	570	1140	1690	2270
Trubice 3	$f[Hz]$	580	1150	1740	2290

Tabulka 4.4 - Porovnání naměřených rezonančních frekvencí otevřené trubice s výpočtem.

Nejvíce se hodnoty shodují na fundamentu ($n = 1$). U trubice číslo 3 jsou odchylky přesnější u všech čtyř vzniklých módů. Je možné tedy uvažovat, že v trubici s menší menzurou a větší tloušťkou stěny vznikají rezonanční módy přesněji na celočíselných násobcích (to dozajista souvisí i s korekcemi na otvor (viz 3.1.1.). Trubice 3 je též z jiného materiálu, než ostatní, ale o tom později.

Problém nastává u hodnot, které byly naměřeny poté, co byl jeden otvor zakrytý viz obr.č.4.3., tedy simulace polouzavřené trubice. Byl očekáván lichý rejstřík (tedy absence sudých harmonických) a vzorek měl znít o oktávu níže.



obr. č. 4.3 - Pro simulaci polouzavřené trubice byl zakrytý otvor, jenž je blízký otvoru, kterým se vhání vzduch.

Vzorky takto nahrané ve spektru vykazují také sudé i liché harmonické a jejich fundamenty jsou od fundamentů otevřené trubice vždy rozladěné asi o 100Hz.

Tento jev je způsobený místem vhánění vzduchu do nástroje. Proud vzduchu by neměl narušovat tlakové kmity vlnění v trubici a měl by do nástroje vstupovat v místě tlakového uzlu. Tím, že tlak vstupujícího proudu vzduchu ovlivňuje kmitnu tlaku vlnění v trubici, mohou vznikat neharmonicity a celé spektrum se může rozladit, jako je tomu v tabulce 4.3. Otvor, který se nachází asi 25mm od kraje trubice, se bude nacházet v uzlu pouze s malou pravděpodobností (maximálně uzlu nějaké vyšší harmonické).

V trubici na obou koncích otevřené je vidět, že hodnoty pro změřené a vypočítané spektrum si i přes určitou odchylku odpovídají. Na otevřeném konci má tlak uzel, takže se otvor nachází poblíž uzlu a rozladění se ještě tolik neprojevilo. Uzavřený konec má ovšem tlakovou kmitnu a otvorem je proud vzduchu vháněn „kousek za kmitnou“ tlaku. Tím dojde k rozladění spektra (vlivem posouvání uzlů) a hodnoty naměřené a spočítané si vůbec neodpovídají.

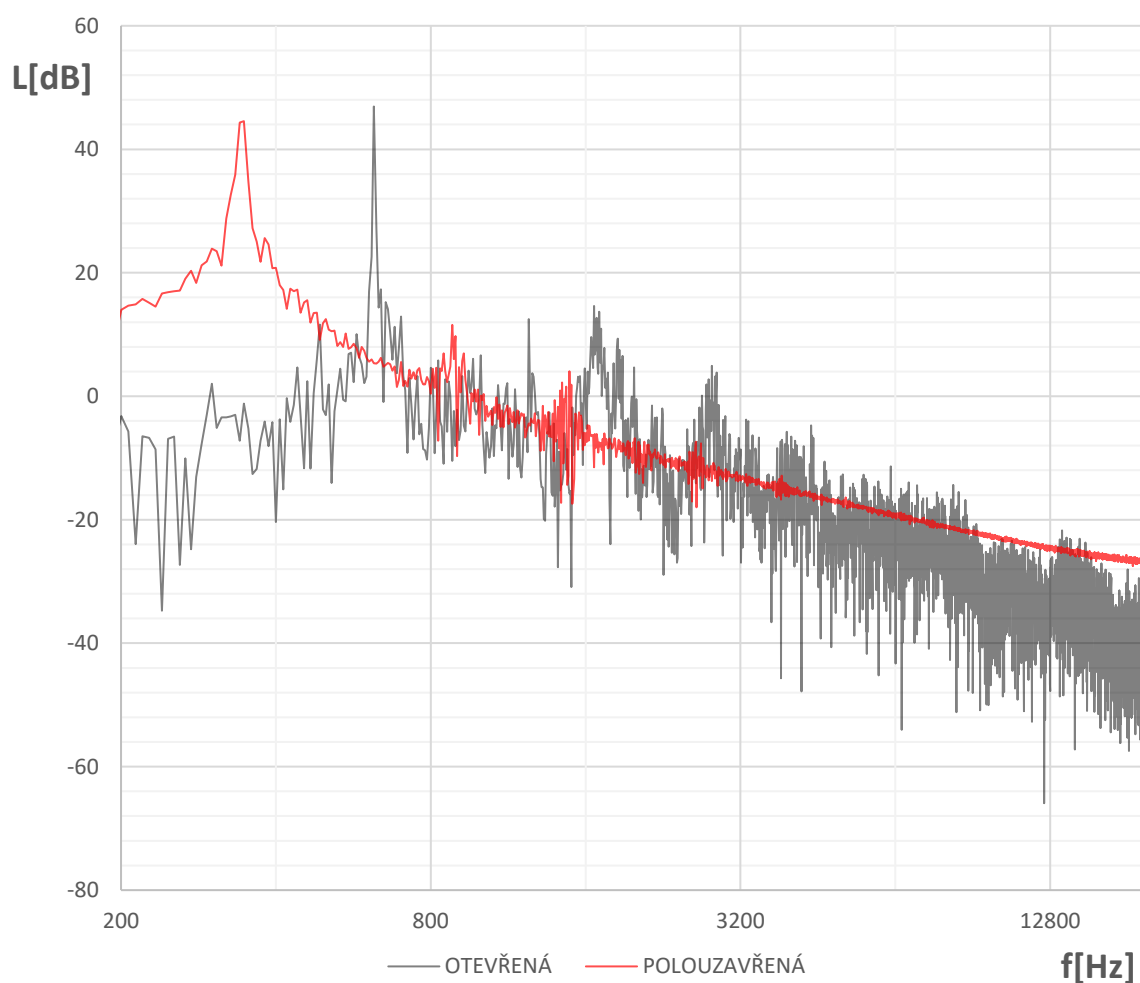
Pro lepší výsledek měření je tedy zapotřebí vhánět vzduch do nástroje v místě uzlu, jako například u zobcové flétny vzniká zvuk v labiu, které je umístěno na jednou z konců nástroje.

4.1.3 Vzduchový otvor v polovině

Z důvodu nepřesností v předchozí kapitole byl do trubice č.1 experimentálně vyvrtán ještě jeden úplně stejný otvor se zabroušenou hranou, jako je na kraji trubice. Otvor byl vytvořen přesně uprostřed délky. Původní otvor byl zacpán a pro otvor uprostřed byly nahrány dva zvukové vzorky opět pro otevřenou a polouzavřenou trubici.

TYP	HARMONICKÁ	1	2	3	4
$f_n = n \frac{c}{2l}$	Frekvence[Hz]	592	1184	1777	2369
$f_n = (2n - 1) \frac{c}{4l}$	Frekvence[Hz]	296	888	1481	2073
OTEVŘENÁ	Frekvence[Hz]	620	1241	1701	2862
POLOUZAVŘENÁ	Frekvence[Hz]	340	880	1487	2081

Tabulka 4.5 - Porovnání naměřených a spočítaných hodnot rezonančních frekvencí, při vytváření tónu uprostřed trubice.

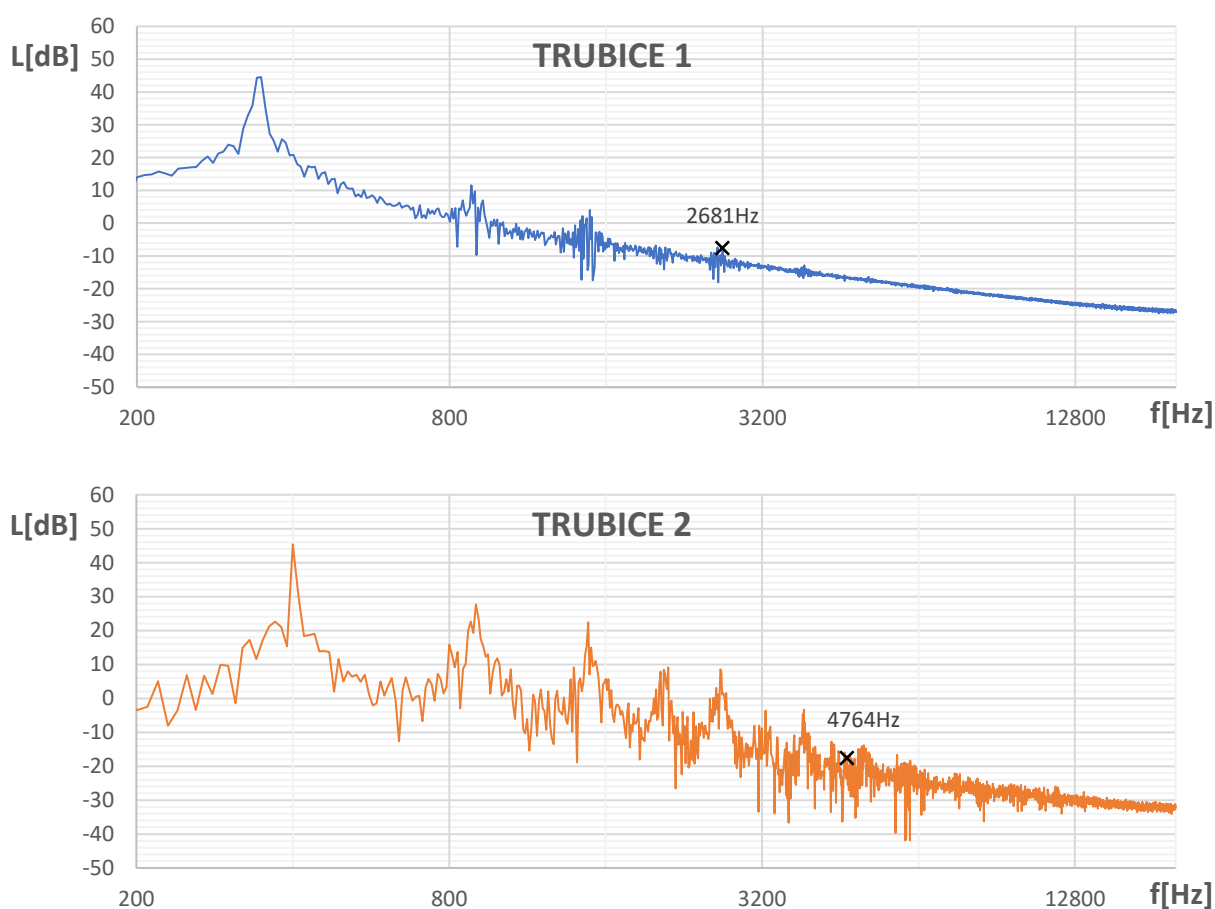


Graf 4.1 - Spektra polouzavřené a otevřené trubice při vhánění vzduchu uprostřed.

Tento pokus se jeví jako velice úspěšný. Polouzavřená trubice má sice rozladěný fundament (o 44 Hz), ale její vyšší harmonické se s rozdílem jednotek Hz shodují s vypočítanými hodnotami. Také je vidět, že už platí, že polouzavřená trubice zní o oktávu níž, než stejně dlouhá trubice otevřená.

4.1.4 Srovnání podle menzury

Menzurou je u píšťal myšlen vnitřní průměr trubice. Je to tedy rozměr odpovídající parametru d z tabulky 4.2. Vzorky tedy mají odlišné menzury. Trubice č. 1 a 2 jsou dokonce ze stejného materiálu a se stejnou tloušťkou stěny. Pokud postavíme zvukové vzorky těchto dvou trubic vedle sebe, můžeme předpokládat, že vliv jiné menzury zde bude nejčitelnější.



Graf 4.2 - Spektra trubic 1 a 2 v polouzavřeném stavu (otvor uprostřed). Se zaznačenými mezními kmitočty, za kterými se už netvoří další složky.

Porovnáváné menzury jsou tedy $d_1 = 46 \text{ mm}$ a $d_2 = 36 \text{ mm}$. Prostor s větším průměrem, tedy prostor s menší akustickou impedancí utlumuje schopnost tvorby vyšších harmonických. Vidíme, že u trubice s vyšším průměrem dochází k minimální tvorbě vyšších harmonických, a pozorujeme pouze dominantní fundament.

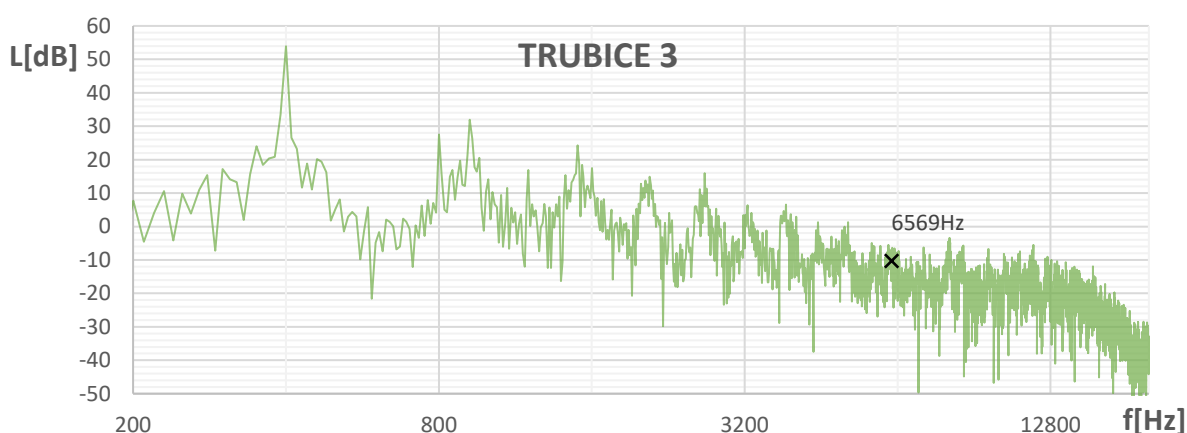
Zároveň otevřeným koncem trubice unikají všechny „kratší“ vlnové délky. Otevřený konec funguje v podstatě jako takový filtr dolní propusti s mezním kmitočtem odpovídajícím.

$$f_m = \frac{c}{2d}$$

Vztah vychází z rovnice pro vlnovou délku, ale místo vlnové délky je dosazen vnitřní průměr trubice. Pokud dosadíme $c = 343 \text{ m/s}$ a průměr trubice č. 2 $d = 36 \text{ mm}$ dostaneme kmitočet 4764 Hz, který je znázorněn v grafu. Lze pozorovat, že nad tímto kmitočtem není žádný výskyt rezonancí a průběh už je pouze šumového charakteru. Tento jev souvisí z tzv. mezní frekvencí a výskytem příčných kmitů. (viz 3.1.1.)

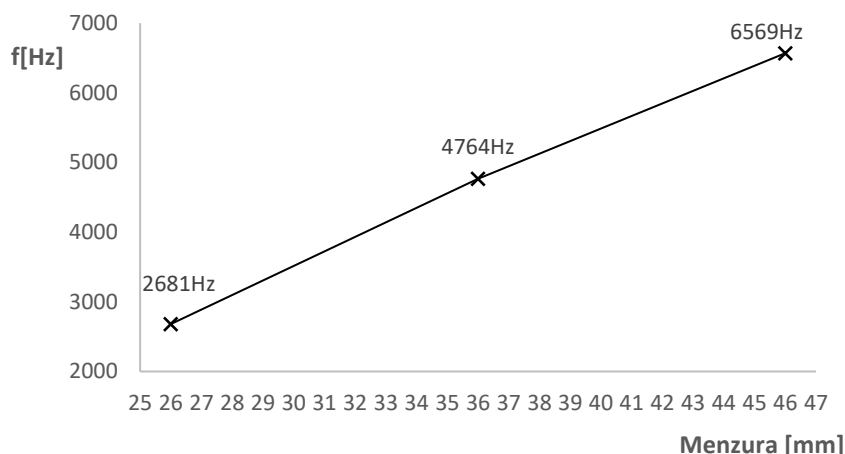
Vzdušné sloupce však nekmitají pouze ve směru převažujícího rozměru trubice nástroje. Protože změny akustického tlaku jsou „všesměrové“, vyskytují se v dechových nástrojích vedle „podélně“ orientovaných kmitů též poměrně intenzivní kmity příčné. Výskyt příčných kmitů je spojován s pojmem mezní frekvence, která ve frekvenčním spektru znějícího tónu od sebe odděluje oblast působnosti podélných rezonancí vzdušného sloupce od rezonancí příčných, resp. odděluje oblast nižších diskrétních harmonických složek od vyšších složek převážně neharmonického či šumového charakteru. [2]

Třetí trubice má menzuru ještě menší $d_3 = 26 \text{ mm}$ a zároveň tlustší stěnu $T_3 = 7 \text{ mm}$. V porovnání s předchozími dvěma trubicemi vykazuje ještě pestřejší spektrum. V grafu 3.3 vidíme, že mezní kmitočet se s menším průměrem posunul ještě výš (přesně 6596 Hz).



Graf 4.3 - Spektrum trubice 3. v polouzavřeném stavu. (otvor uprostřed) s vyznačeným mezním kmitočtem.

Obohacení spektra oproti trubici 2 je zde způsobeno především dalším zmenšením menzury. Jiná tloušťka stěny má dozajista také vliv, ale na to, abychom bylo zjištěno do jaké míry, tak by bylo zapotřebí změřit dva vzorky se stejnou menzурou, ale odlišnou tloušťkou stěny. Závislost z těchto tří měření byla vynesena do grafu 4.4 a vykazuje lineární charakter.



obr. č. 4.4 - Závislost mezní frekvence na velikosti menzury.

4.1.5 Vlastnosti materiálu

U vzorků trubíc se jedná o vnitřní vodovodní a odpadní potrubí. Při hledání v online katalozích bylo zjištěno, že všechny trubice se vyrábí z polypropylénu (PP). Trubice 1 a 2 jsou tzv. HT trubice využívány k odvodu odpadních vod ve vnitřních prostorách domů a třetí trubice je tzv. PPR, využívaná k rozvodům vody. [9] [10]

TRUBICE 1 a 2	
Hustota $\rho [kg/m^3]$	950
Modul pružnosti $E [N/mm^2]$	1275
TRUBICE 3	
Hustota $\rho [kg/m^3]$	905
Modul pružnosti $E [N/mm^2]$	900

Tabulka 4.6 - Vlastnosti materiálů zjištěné z katalogů.

Měření hustoty

Hustota trubíc HT a PPR byla ještě paralelně zjištěna z hmotnosti a z objemu V. Hodnoty obsahů a hmotností jsou v tabulce 4.2.

$$V = (S_D \cdot l) - (S_a \cdot l) \rightarrow \rho = \frac{m}{V}$$

Z objemu byly ještě odečteny korekce, které zohledňují vyvrtané díry. Pro HT trubice vychází vypočítaná hustota $\rho = 883[kg/m^3]$ a pro trubici PPR $\rho = 923[kg/m^3]$. Ze změřených hodnot hustoty vyplývá přesný opak, než z hodnot katalogu. PPR trubka má najednou větší hustotu než HT.

Akustická konstanta

Z těchto zjištěných hodnot můžeme určit akustickou konstantu materiálů obou trubek. Je možné použít vztah:

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}$$

Materiál	HT	PPR
$K_A[N \cdot m \cdot kg^{-1}]$ (Pro změřenou hustotu)	1,361	1,070
$K_A[N \cdot m \cdot kg^{-1}]$ (Pro katalogovou hustotu)	1,219	1,102

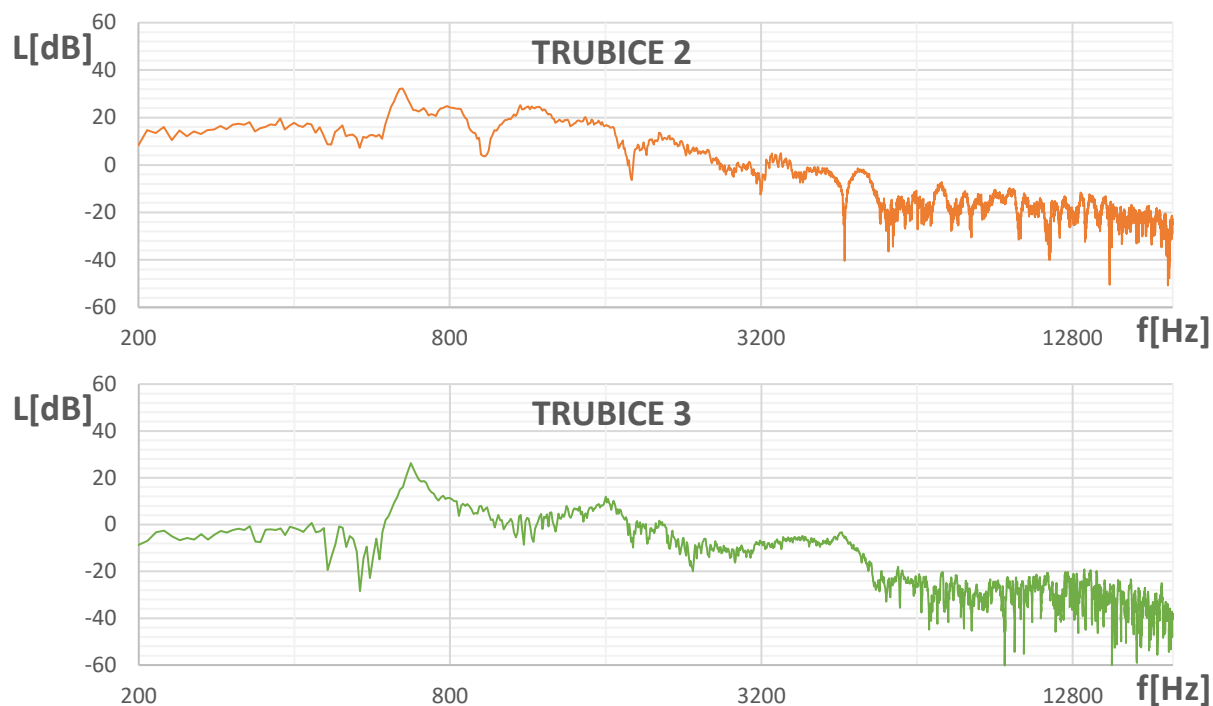
Tabulka 4.7 - Tabulka spočítaných akustických konstant.

Výsledky akustických konstant jsou velmi překvapivé. U obou materiálů vychází podobné vyzařovací schopnosti. U trubice HT je výsledek nepatrně větší než u PPR. Zároveň vychází podobně hodnoty jak pro měřenou, tak katalogovou hustotu. Překvapivé je na tomto výsledku především to, že hodnota blízká $K_A = 1$ znamená velmi malou schopnost vyzařování zvuku. Tato hodnota je ještě menší, než například u grenadilového dřeva, které je známo pro nejtužší vlastnosti a jeho akustická konstanta se pohybuje okolo $K_A = 2.5$. Toto zjištění by znamenalo, že zobcové flétny s barvou, která je dutá a nevýrazná se velmi dobře dá dosáhnout právě s rezonátory z polypropylénu.

V následujícím pokusu bude demonstrováno, zdali vzniklé spektrum ovlivňuje rezonance samotného těla nástroje. Hranový tón rozkmitává vzduch v trubici, což vytváří základní spektrum, ale tyto kmity mohou být přeneseny na tělo nástroje, které se rozkmitá a svojí rezonancí může ovlivnit barvu nástroje.

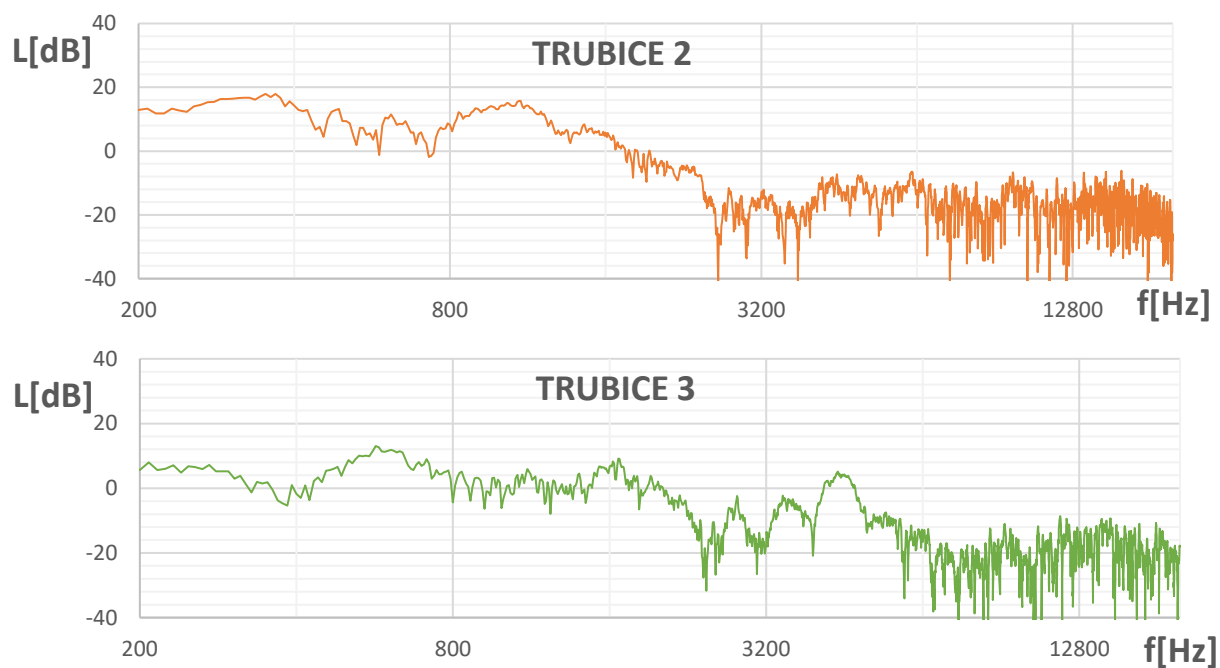
Byly změřeny následující vzorky. Na jednotlivé trubice bylo poklepáno rukou zhruba uprostřed těla. Trubice byly při měření pouze lehce drženy dvěma prsty.

Ťuknutím do volně uložené trubice by se tělo mělo rozkmitat na svých rezonančních módech. Porovnány budou opět trubice 2 a 3.



Graf 4.4 - Spektra po poklepání trubic 2 a 3.

Takto změřené vzorky vykazují u trubice č. 3 rezonance v okolí kmitočtů 680 Hz, 1616 Hz a 4600 Hz. U trubice č.2 lze pozorovat rezonanci ještě více. Aby bylo zamezeno rezonancím vzdušného sloupce, tak byly trubice ucpány kusem látky a měření bylo opakováno.

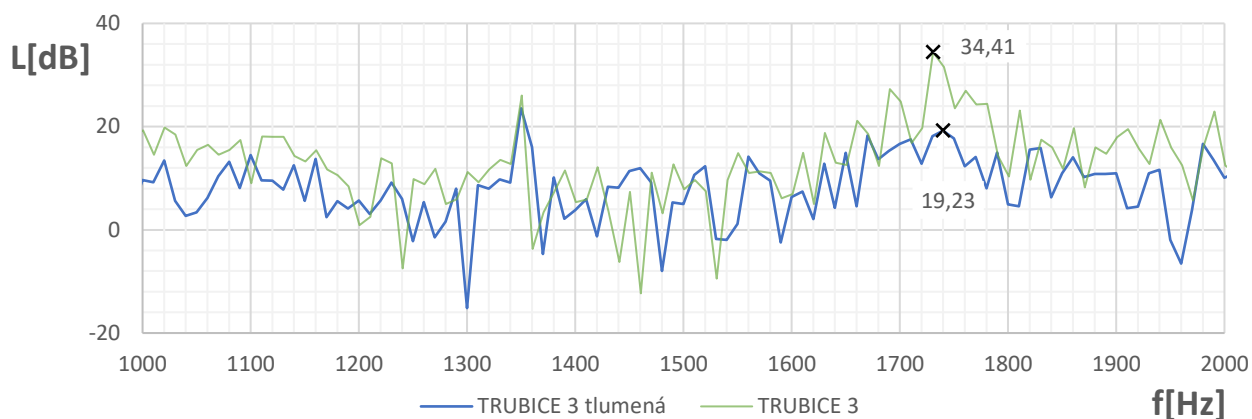


Graf 4.5 - Spektra po poklepání trubic 2 a 3 (zatlumených).

U trubice č.3 se stále objevují formanty okolo všech tří frekvencí z předchozího měření. Ucpání trubice č.2 výrazně ovlivnilo spektrum a zbyl pouze jediný formant okolo 1104 Hz. Nárůsty v nižších pásmech (>500 Hz) nemusí být uvažovány. S největší pravděpodobností nejsou způsobeny rezonancí těla trubice, ale například proximity efektem u mikrofonu, kterým bylo měřeno.

Pro hledání vlivu rezonance těla trubice byly vzorky obaleny molitanem a bylo změřeno jejich spektrum při rozeznění otvorem uprostřed. Molitan by měl zatlumit efekt rezonance těla a porovnáním s nezatlumeným vzorkem by se mohly ve spektru objevit rozdíly.

Spektra tlumených a netlumených vzorků se výrazným způsobem neliší. U trubice č.2 lze najít pouze několik drobných poklesů, které by se ovšem daly také vysvětlit rozdílným foukáním do trubice jak intenzitou vdechu, tak i úhlem pod jakým byl proud vzduchu na retnou hranu hnán.



Graf 4.6 - Frekvenční pásmo 1-2 kHz hraného tónu třetí trubice při zatlumení látkou i bez zatlumení. (lineární měřítko)

Jasný a výrazný rozdíl byl nalezen u trubice č. 3 (viz graf 4.6). Zde se dá i s jistotou říct, že nejde o rozdíl způsobený jinou intenzitou či úhlem proudu vzduchu, protože obě spektra jsou velmi podobné a především na stejné hladině hlasitosti a v okolí kmitočtu 1740 Hz, je zde náhlý rozdíl přibližně 15 dB. Tento kmitočet zároveň odpovídá zhruba střednímu kmitočtu jednoho z formantů vytvořených po poklepání této trubice (viz graf 4.5.).

Z tohoto srovnání vyplývá, že materiál může lokálně výrazně posílit spektrum. Zde konkrétně se tomu tak stalo na 3. harmonické otevřené trubice č. 3.

5. ANALÝZA ZOBCOVÝCH FLÉTEN

V této kapitole bude porovnáno několik zobcových fléten altového a sopránového hlasu. Tyto flétny mají všechny velmi podobné rozměry, ale jsou z jiného materiálu. Jedná se o flétny sopránové a altové.

5.1.1 Přehled měřených fléten

Pro následující měření bylo vybráno sedm fléten. Tři z nich jsou zobcové flétny altové a čtyři z nich potom sopránové.

Model	Typ	Materiál	Výrobce
Rottenburgh 4305	Alt	Palisandr (<i>Dalbergia Stevensonii</i>)	Moeck
Rottenburgh 4307	Alt	Grenadil (<i>Dalbergia Melanoxylon</i>)	Moeck
Rottenburgh 4308	Alt	Rosewood (<i>Dalbergia Decipularis</i>)	Moeck
YRS-312BIII	Soprán	Plast (ABS resin)	Yamaha
YRS 24B	Soprán	Plast (ABS resin)	Yamaha
Rottenburgh 4205	Soprán	Palisandr (<i>Dalbergia Stevensonii</i>)	Moeck
Adri's Traumflöte 4119	Soprán	Hrušeň	Mollenhauer

Tabulka 5.1 - Seznam měřených zobcových fléten.

U altových fléten se jedná o flétny od výrobce Moeck a všechny jsou ze stejné série Rottenburgh. Je zde tedy vysoká pravděpodobnost, že rozměry budou velmi podobné a vliv rozdílných materiálů (jiného dřeva) bude efektivně pozorovatelný. Altové flétny jsou laděny v F. U sopránových fléten jsou rozdíly složitější a jedná se jak o flétny z různých materiálů, tak i o flétny od jiných výrobců a tedy pravděpodobně odlišných modelů (rozměrů). Sopránové flétny jsou laděny v C. Všechny flétny mají barokní prstoklad. Mezi sopránovými flétnami je jeden velmi zajímavý model. Jedná se o typ Traumflöte neboli z angličtiny *Dream Flute*, nebo česky *zasněná flétna*. Všechny ostatní altové a sopránové flétny v tabulce 5.1 vycházejí z barokního modelu zobcové flétny. Zasněná flétna ovšem vychází už z modelu renesanční flétny. Což jí značným způsobem odlišuje od zde představených fléten. Hlavním rozdílem je, že její vnitřní vrtání je po celé délce vzdušného sloupce válcové. Dále pak má vyvrtány větší

prstové díry (zároveň i spodní otvor je mnohem větší) a skládá se pouze z dvou dílů. Nožka tvoří jeden díl společně s korpusem (tělem).

5.1.2 Dřeviny

Palisandr a Růžové dřevo (Rosewood) – Jedná se v podstatě o stejný druh dřeviny. Pokud je materiál dřeva označený jako palisandr nebo rosewood, tak se jedná z pravidla o dřeva z rostlinného rodu Dalbergie. Existuje mnoho druhů všude po světě. Palisandr může pocházet z více druhů Dalbergie, jako například (Nigra, Seversonii, Baronii). Konkrétně v této práci se jedná o palisandr z dřeviny Dalbergia Seversonii (běžně nazýván jako Hunduran Rosewood). Nástroj (Rottenburgh 4308), jehož materiál nese označení rosewood, je pak vyroben z Dalbergie Decipularis (běžný název Tulipwood). Tato dřevina je označovaná jako „true rosewood“, tedy pravé růžové dřevo a roste pouze na malém území v severovýchodní Brazílii. [11]

Grenadil – jedná se také o dřevo druhu Dalbergia (přesněji Dalbergia Melanoxylon běžně nazývané jako African Blackwood). Je většinou ještě tvrdší a hustější než ebenové dřevo. Africké černé dřevo je považováno za jedno z nejtvrdších a nejhustších dřev na světě. [11]

Další dřevinou je hrušeň. Zobcové flétny od výrobce Yamaha jsou vyrobeny z plastové pryskyřice ABS resin. Tento materiál se mimo jiné používá k výrobě nárazníků automobilů. Je to hustý a pevný materiál.

5.2 Altové flétny

Jak už bylo zmíněno, tak u této skupiny bude pozornost zaměřena na vliv materiálu těla nástroje na barvu zvuku zobcové flény. Nutno podotknout, že všechny tři flény jsou z poměrně tvrdého dřeva. To znamená, že jejich akustická konstanta bude mít nižší hodnoty. Vliv rezonance materiálu by tedy neměl být tak výrazný.

5.2.1 Rozměry

U každého nástroje byly změřeny rozměry, které by mohly mít vliv na barvu výsledného tónu. Jedná se o délky vzdušného sloupce, vzdálenosti mezi otvory a jejich průměry. Dále pak průměry vnitřní dutiny. Rozměry altových fléten jsou změřeny především ze zvědavosti do jaké míry se liší tyto zobcové flény, pokud jsou ze stejné řady jednoho výrobce. Pokud by se i tak rozměry neshodovaly, je jasné, že změnou materiálu je nucen výrobce změnit i mechanické rozměry za účelem potlačení, či zvýraznění určitých aspektů daného materiálu.

Po změření rozměrů bylo zjištěno, že se tyto flétny od sebe rozměrově liší opravdu pouze detaily. Ovšem mohlo by být předčasné považovat tyto rozdíly za nepodstatné, protože do určité míry mohou mít svůj účel. Zároveň je nutné mít na paměti, že měření probíhalo velmi nepřesnou formou. Flétny byly pro účely této práce pouze zapůjčené. Měření probíhalo pouze pomocí metru a pravítka. Při použití například posuvného měřítka by mohlo dojít k poškrábání těla nástroje. Měření je tedy přesné maximálně na jednotky milimetrů.

Název Rozměru				Hodnota [mm]					
l				415					
1				32					
2				30					
3				35					
4				35					
5				27					
D1				18					
D2				13					
Dírky									
O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7		O8	
7	6	7	7	6	7	5	3	5	3

Tabulka 5.2 - Rozměry altových fléten v milimetrech.

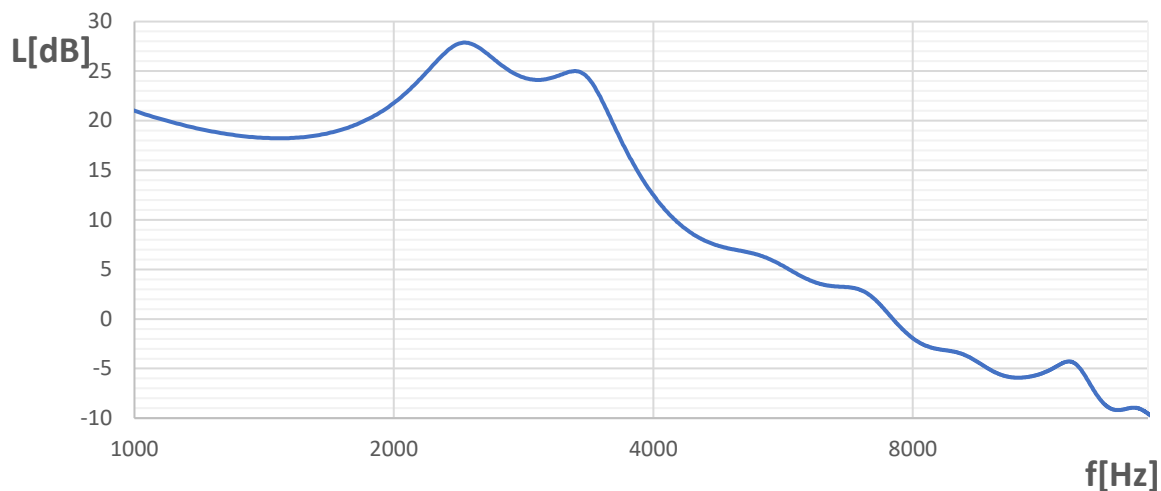
Rozměry *1-5* jsou vzdálenosti středů prstových otvorů (od vrchu 1-5). *O1-O8* jsou průměry otvorů (*O1* je přefukovací otvor a následně postupně až k *O8*, což je druhý dvojitý otvor). Rozměr *l* je délka vzdušného sloupce. To je tedy vzdálenost od ústí šterbiny (labium) až po spodní konec. *D1* a *D2* jsou průměry vnitřní dutiny. Pokud je flétna po celé délce válcová, tak má pouze jeden rozměr *D1*.

V tabulce 5.2 jsou hodnoty změřené pro model Rottenburgh 4305 (palisandr). Následující dva modely se od tohoto liší pouze minimálně. Například nástroj z růžového dřeva vykazuje menší vnitřní průměry a průměry prstových otvorů.

5.2.2 Tón f¹

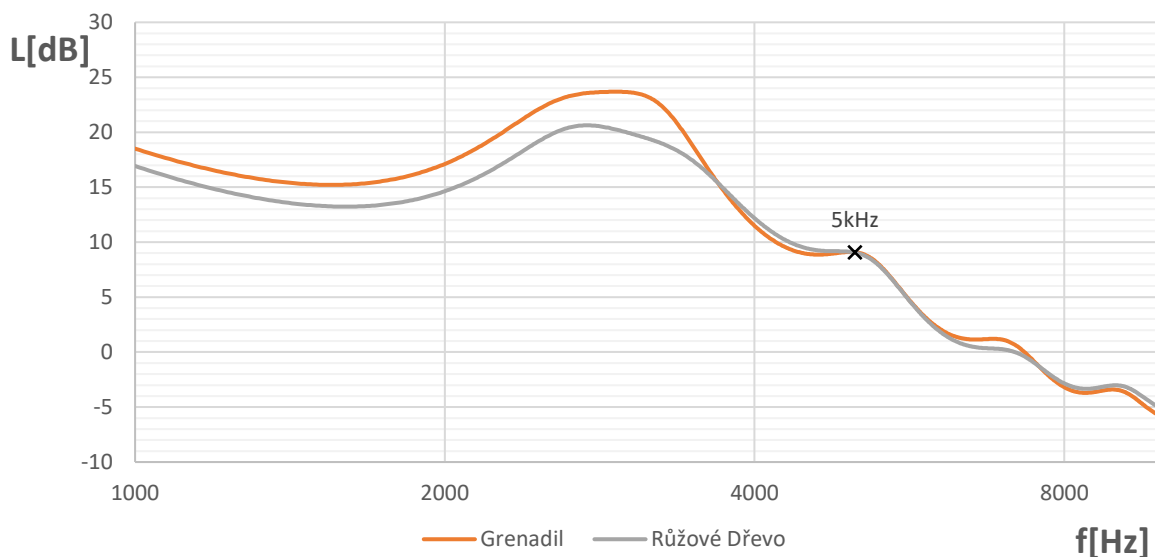
Jedná se o nejnižší tón na altové flétně (naladěné v F). To znamená, že všechny otvory jsou zakryté. To vytváří jistotu, že na spektrum nemají vliv rezonance v prstových otvorech. Při měření spektra těchto tónů vyšel najevo překvapivý výsledek. Při měření bylo očekáváno nejchudší spektrum u modelu z nejtvrďšího dřeva (Grenadil). To se ovšem projevilo u modelu

z palisandru. Tento model má větší modul pružnosti a menší hustotu, tím pádem větší akustickou konstantu.



Graf 5.1 - Spektrum tónu f^1 hraného na Rottenburgh 4305 (palisandr). Analyzované pomocí LPC.

Všechny tři modely mají společný silný formant v oblasti kolem kmitočtu 3 kHz. Nástroje z grenadilu a z růžového dřeva mají, co se týče formantových oblastí, skoro totožné průběhy.



Graf 5.2 - Průběhy formantových oblastí analyzovaných pomocí LPC.

Oproti flétně z palisandru zde vidíme pozvolnější pokles za prvním hlavním formantem. Dokonce je zde kolem frekvence 5kHz ještě další menší formant, který se v modelu z palisandru vůbec nevyskytuje.

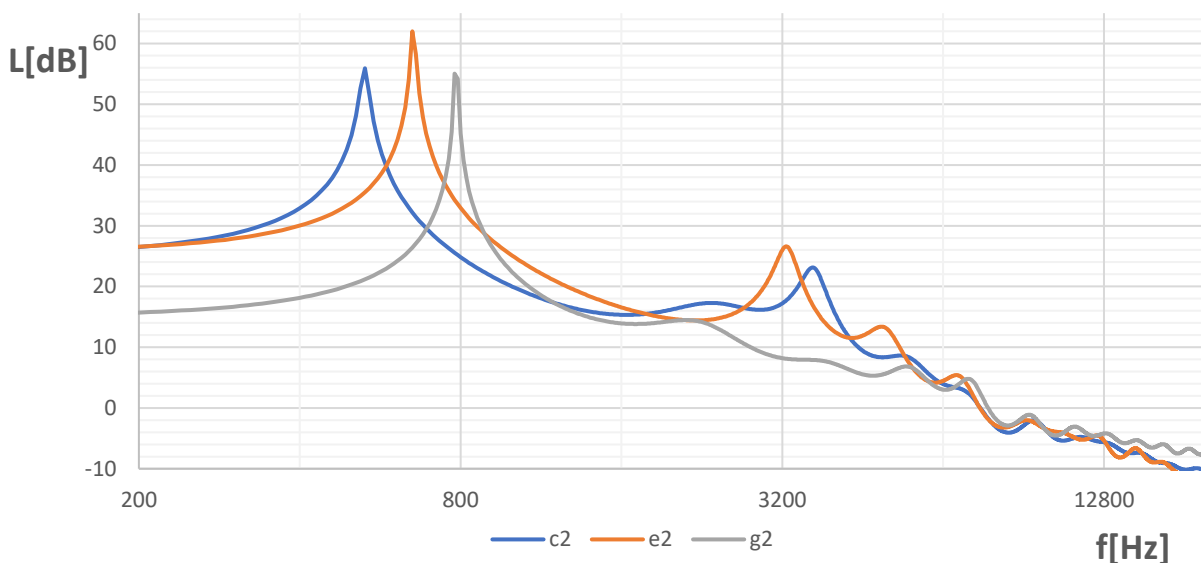
V grafu číslo 5.1 lze pozorovat mnohem prudší pokles hladiny hned za společným formantem. Nutno dodat, že v této analýze nelze brát nijak v úvahu intenzitu v daných pásmech. Pro tuto práci byly vzorky nahrány hráčkou na zobcové flétny a nelze s jistotou říct, do jaké míry bylo při nahrávání jednotlivých vzorků foukáno do fléten stejnou silou. Zde lze tedy pouze pozorovat charakter průběhů.

5.2.3 Analýza formantů v dalších tónech

Pro tuto práci bylo nahráno více tónů na každé flétně. Co se vlastně děje, když je hrán čím dál vyšší tón? Fundament se posouvá stále výš, takže spektrum tónu je takto stále více zesponu ořezáváno. Z vrchu je také omezené. Každá zobcová flétna má určitý vnitřní rozměr. Od určité výšky tónu se v dutině už nemohou tvořit podélné kmity právě v závislosti na velikosti průměru vnitřní dutiny. V tomto případě je uvažováno harmonický charakter spektra. Za touto hranicí stále mohou vnikat ruchové a šumové složky, způsobené například rezonancí děr nebo příčnými kmity. Tato problematika je částečně popsána v kapitole 4.1.4. při analýze menzury.

Při hraní vyšších tónů nespočívá chudší spektrum pouze ve výskytu vyšších harmonických na čím dál vyšších kmitočtech, ale i na skutečnosti, že je odkryto většinou velké množství otvorů, kterými uniká energie. Ubývá tedy rezonancí ve vzdušném válci, ale zase nabývá možnost vzniku slyšitelných rezonancí v odkrytých otvorech.

Při srovnání LPC křivek dalších vyšších tónů na jedné flétně lze jasně pozorovat slábnutí formantových oblastí a rostoucí dominanci základního fundamentu.

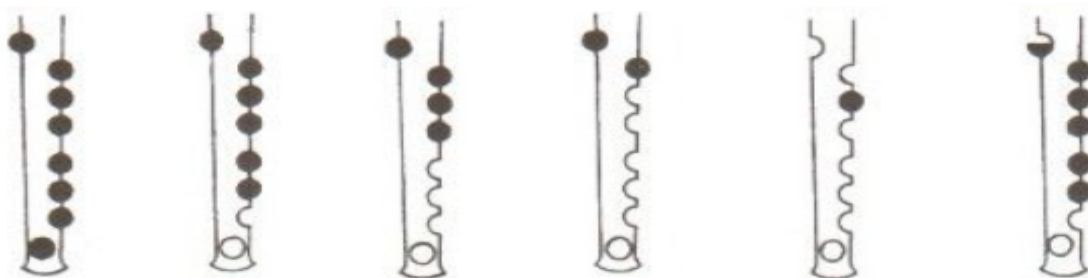


Graf 5.3 - LPC obálky spektra tří různých tónů nástroje Rottenburgh 4305 (palisandr).

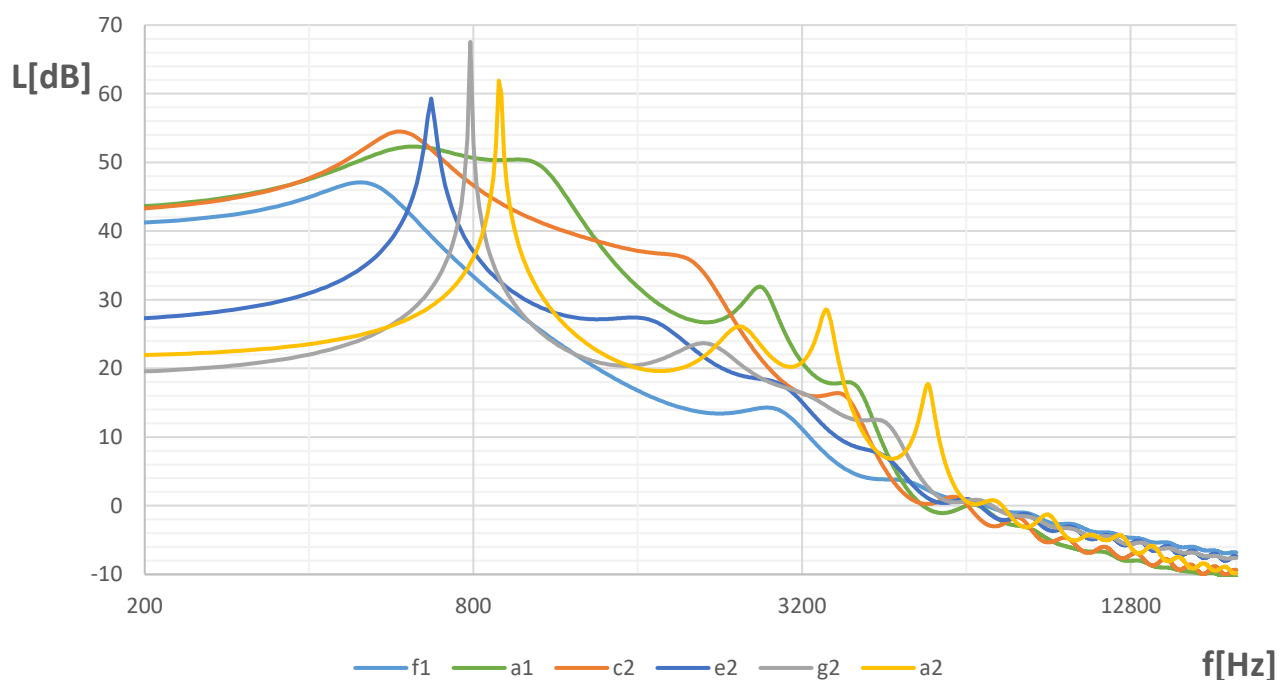
Při pohledu na tyto průběhy je nutné si především všimnout skutečnosti, že je zde znatelná formantová oblast v rozmezí 2-4kHz. Znatelný pokles v této oblasti přichází na g^2 . Podle toho, že nejsilnější je ve formantové oblasti tón e^2 , by se dalo předpokládat, že intenzita formantů od hlubokých tónů postupně neklesá, ale spíše mírně roste a následně rychle klesne. S největší pravděpodobností se jedná o různé typy hmatů. U tónu c^2 a e^2 se pouze zkracuje vzduchový sloupec, ale u nejvyššího tónu g^2 jsou odkryty všechny otvory včetně spodního přefukovacího otvoru.

5.2.4 Vliv prstokladů

Zde bude podrobněji prozkoumán vliv různých prstokladů na změny ve spektru z předchozí kapitoly. Na plastovou altovou zobcovou flétnu bude nahráno několik tónů skrze jednu a půl oktávy a budou sledovány výrazné změny na různých hmatech. Jedná se o neznámý typ zobcové flétny, která slouží při práci jako praktická pomůcka, protože není možné mít všechny zapůjčené (nahrané) modely stále k dispozici.



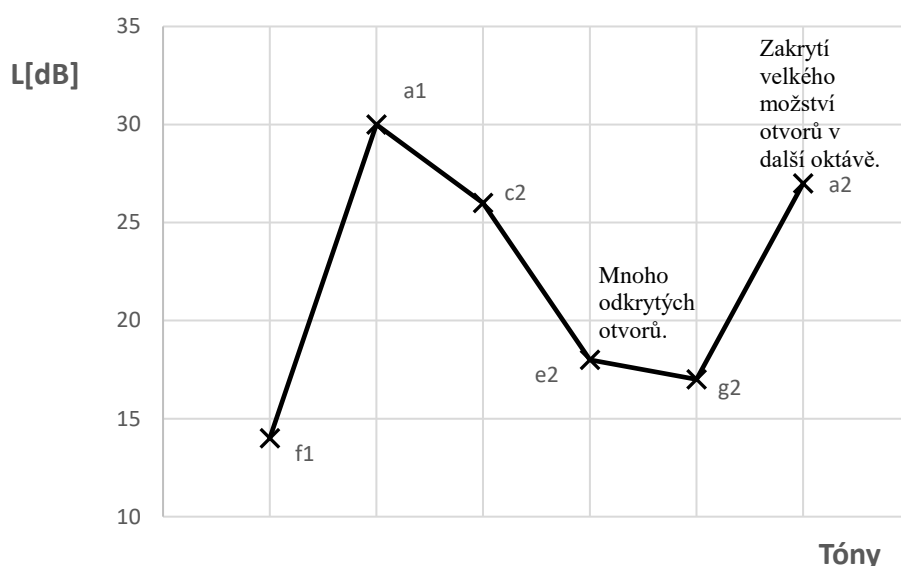
obr. č. 5.1 -Prstoklady tónu f^1 , a^1 , c^2 , e^2 , g^2 , a^2 jdoucích zleva doprava.



Graf 5.4 - LPC obálky vybraných tónů na plastové altové flétně.

Byly nahrány tóny f^1 , a^1 , c^2 , e^2 , g^2 , a^2 viz obr. č. 5.1. Obálky spekter těchto tónů nahraných na plastovou altovou flétnu jsou vyneseny v grafu č. 5.5. Lze pozorovat podobný jev jako u dříve popsáných tónů c^2 , e^2 , g^2 . Je jasné, že spektrum plastového nástroje se bude od nástroje z palisandru a také od jiného výrobce v jistých ohledech lišit. Plastová flétna má například velmi silnou druhou harmonickou. To odlišuje charakter prvních hlubších tónů, kde nevidíme dominantní jednu hodnotu fundamentu, ale zaoblený průměr prvních dvou výrazných složek spektra.

Dalším rozdílem je například skutečnost, že k potlačení formantové oblasti dochází už na tónu e^2 . Model z palisandru měl na tomto tónu ještě výrazné formanty. Při odkrývání děr sílí formantové oblasti do určitého momentu, kdy při odkrytí velkého množství děr odchází mnoho energie pryč z nástroje a formantová oblast rázem slábne.



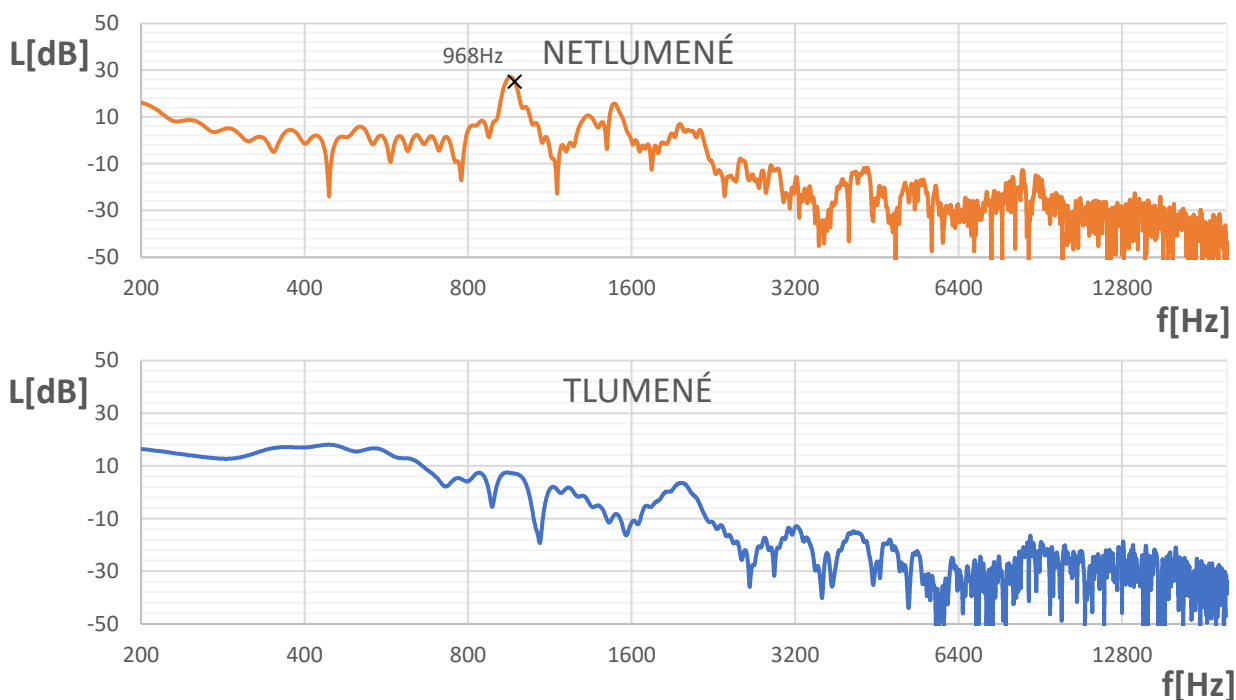
Graf 5.5 - Průměrná intenzita tónu v okolí formantových oblastí jednotlivých tónů. (okolí 2700 Hz)

Tvar a síla formantových oblastí je závislá na odkrytých dírkách. U odkrytých tónů e^2 a g^2 je znatelný pokles a při tónu a^2 formant opět výrazně sílí. Záleží také na poměrech vlnění při jednotlivých prstokladech a jak je vidět, tak závislost není jednoduše lineární.

5.2.5 Tón g^2

Tento tón se, co se týče barvy u jednotlivých nástrojů, zdá dosti rozmanitý. Bylo na něm provedeno několik pokusů. V první řadě byl nahrán i na plastovou flétnu. Což při porovnání s ostatními přineslo první zajímavost. Všechny tři dřevěné flétny vykazují slabší sudé složky. To znamená, že se přibližují rejstříku válcové trubice (liché spektrum). Plastová flétna má všechny své složky podobně silné. Její spektrum je jak sudé, tak liché. Další zajímavostí je čtvrtá harmonická. Na této frekvenci (cca 3150 Hz) je u všech dřev výrazný pokles. Flétna z palisandru zde nemá až tak zásadní pokles, ale například u flétny z růžového dřeva je tato frekvence úplně utlumená.

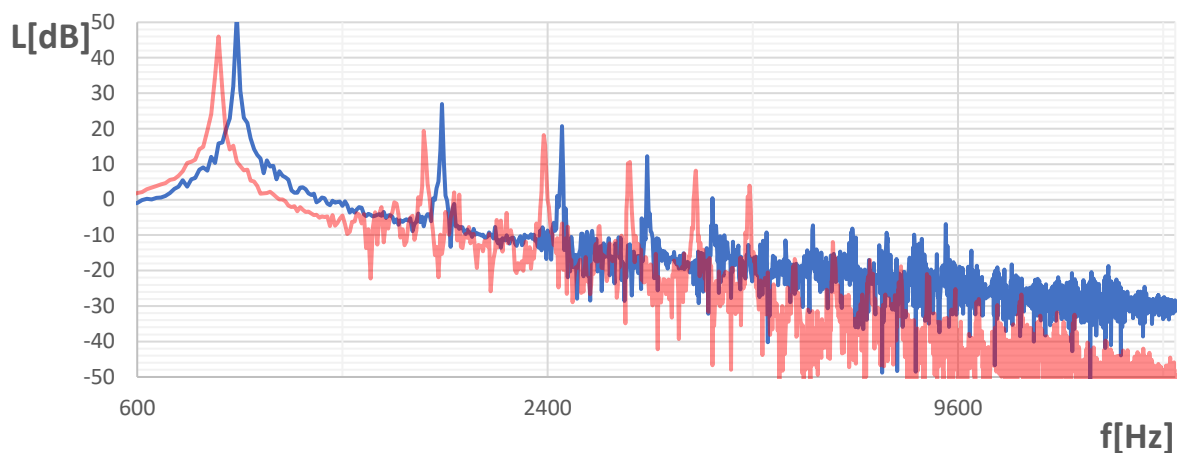
Prvním pokusem je podobně jako v kapitole 4.1.5 hledání módů, které by mohl materiál posílit zaznamenáním rezonancí po poklepání na tělo nástroje. K dispozici v této práci byla fyzicky pouze plastová flétna.



Graf 5.6 - Tlumené a netlumené spektrum plastové altové flétny po poklepání.

V grafu 5.7 je vidět, že materiál na frekvenci 3150 Hz výrazný vliv mít nemůže, protože se v tomto pásmu ve spektru žádná velká rezonance nenachází. Prostřední nárůst hladiny okolo 1500 Hz je možný podporovatel spektra této flétny. Jak už bylo řečeno, barva obsahuje jak sudé, tak liché složky a na tónu g^2 je na této frekvenci první sudá vyšší harmonická. Je pravdou, že oproti dřevěným flétnám je zde velký rozdíl. Tuto složku mají dřevěné flétny velmi slabou, nebo ji vůbec nevykazují. Dalo by se tedy uvažovat, že zde posílil materiál spektrum a tato složka se zde objevila právě kvůli tomu.

V dalším pokusu byla spodní část nástroje zatlumena až po otvor, který se drží při tónu g^2 (O3). Spodní část nástroje byla obalena látkou, ale byla co nejméně stažena tak, aby byly zakryté dírkky, ale nebylo výrazným způsobem zatlumeno tělo nástroje.

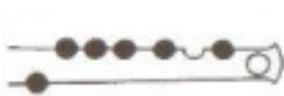


Graf 5.7 - Spektrum tónu se zakrytými dírkami.

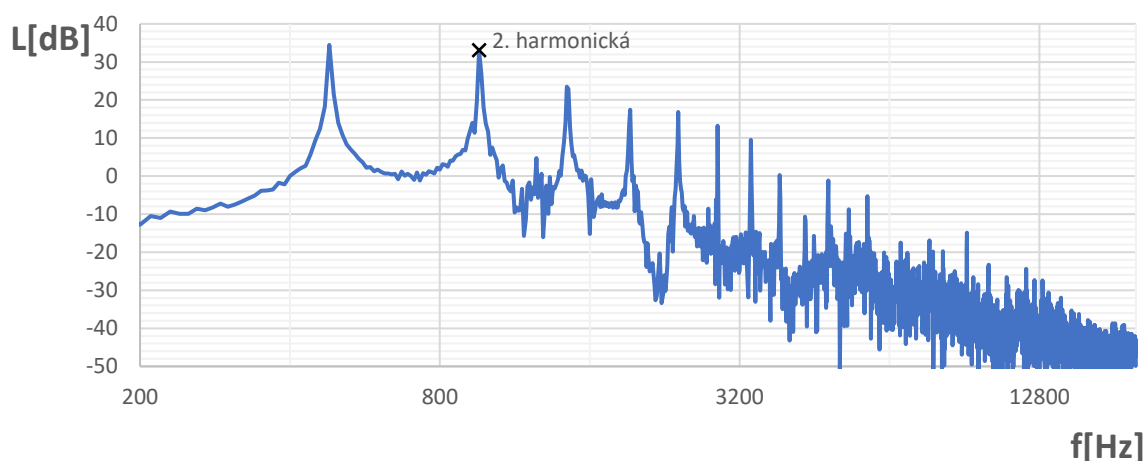
V grafu 5.8 je (modře) vyneseno frekvenční spektru tónu g^2 plastové flétny se zakrytými dírkami. Pro názornost je zde vynesena (červeně) část spektra tónu g^2 hraná na stejný nástroj, ale bez zakrytí. Je vidět, že zakrytí dírek celý tón rozladilo (cca o 50 Hz). Ovšem v pásmu které je vykreslené i pro nezakrytý tón je vidět utlumení 5. a 6. harmonické složky a také následujícího malého formantu. Posun ladění je způsoben posunem uzlů v důsledku změny akustické délky nástroje. Ta počítá s takzvanými korekcemi na otvor, které zohledňují skutečnost, že vlny při vlnění v trubici vystupují i ven z ní.

5.2.6 Posílení druhé harmonické složky

Jak už bylo zmíněno v kapitole 5.2.4, tak u plastové altové flétny je u nejnižších tónů velmi výrazná druhá harmonická. Bylo zkoumáno několik tónů v nízké poloze (od f^1 do c^2). Nejvýrazněji se projevuje druhá harmonická u tónu b^1 . U těchto tónů postupně prochází druhá harmonická rezonančním pásmem z grafu 5.7., kde je střední kmitočet 968 Hz. Fundament tónu b^1 se nachází na frekvenci 466 Hz. Jeho dvojnásobek (druhá harmonická) je 932 Hz. Druhá harmonická ve změřeném spektru plastové altové flétny se navíc nachází ještě něco výše (960 Hz) a je tedy přesně uprostřed rezonance.



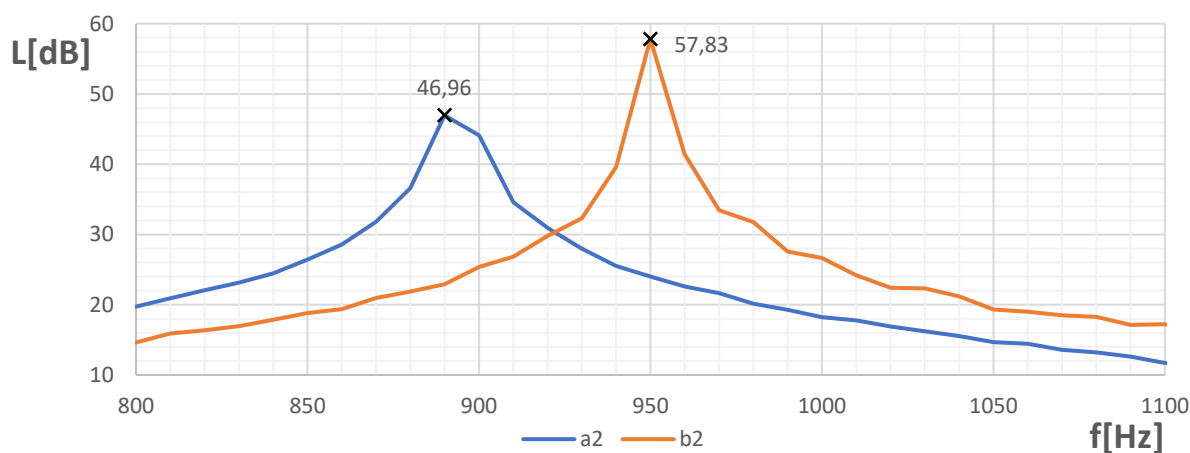
obr. č. 5.2 - Prstoklad tónu b^1 .



Graf 5.8 - Frekvenční spektru tónu b^1 .

Je pozoruhodné, že první dvě harmonické složky jsou v tomto případě stejně intenzivní. Nejedná se najednou o spektrum, které je ikonické pro zobcové flétny. Tedy jeden dominantní fundament, ale přibývá srovnatelně dominantní druhá harmonická. Toto má v barvě nástroje za následek, že tyto spodní tóny jsou oproti ostatní dřevěným altovým flétnám mnohem výraznější. Velice podobně se chová spektrum i na tónu a^1 , kde je pouze přemístěn prst z O7 na O6. U ostatních tónů v okolí je druhá harmonická už vždycky o něco slabší vůči fundamentu.

O oktávu výše lze také pozorovat vliv tohoto posílení. Zde je nástroj přefouknutý a fundament se nachází na dvojnásobku tónu b^1 . V okolí rezonance se nachází samotný fundament. Při hraní na nástroj se to projevuje tím, že tón b^2 je o něco výraznější (silnější) než ostatní tóny kolem něho. V grafu níže je fundament tónu b^2 porovnán s fundamentem o půl tón nižšího tónu a^2 . Prstoklady těchto tónů jsou stejné jako o oktávu níž, ale hrají se s podkrytým otvorem O1. Je jasné, že fundament tónu b^2 je výrazně silnější a to o 11 dB.



Graf 5.9 - Fundamenty a jejich znázorněné úrovně tónů a^2 , h^2 .

5.3 Sopránové flétny

Předem je nutné připomenout, že v této skupině testovaných fléten se jedná o modely, které jsou každá z jiného materiálu, od jiného výrobce a jeden nástroj má dokonce jiné provedení (renesanční, barokní). Budou však rozděleny do dvou podobných kategorií (dřevěné a plastové). Jakým způsobem se tedy liší jejich spektra a jejich barva ve vybraných tónech?

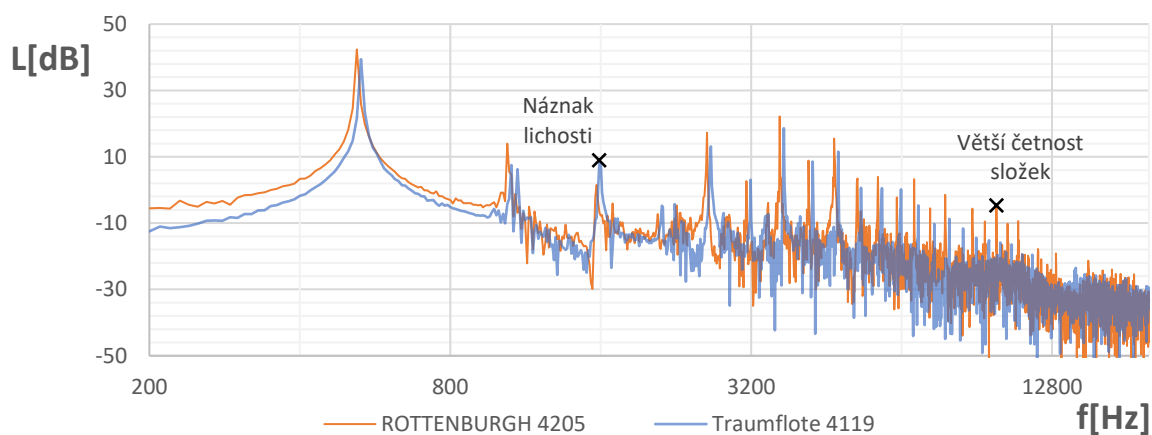
Nástroj	Hustota [kg/m^3]	Modul pružnosti [N/mm^2]	Akustická konst. [$N \cdot m \cdot kg^{-1}$]
YRS-312BIII + YRS 24B	1040	1460	1,139
Rottenburgh 4205	1025	22000	4,520
Adri's Traumflöte 4119	690	7800	4,873

Tabulka 5.3 - Materiálové vlastnosti sopránových fléten.

5.3.1 Dřevěné

Z tabulky 5.3 lze jako první věc dedukovat, že i přes rozdílné hodnoty hustoty a modulu pružnosti vychází akustická konstanta u obou dřevěných fléten velmi podobně.

Při porovnání těchto dvou fléten při zakrytých otvorech (c^2) vychází jejich spektrum velmi podobné.



Graf 5.10 - Tón c^2

Je jasně pozorovatelné, že až do úplně nejvyšších kmitočtů je spektrum obou fléten skoro až totožné. Což je do jisté míry až překvapující, za situace, kdy se jedná o výrazně odlišné modely.

Ve spektru tónu c^2 jsou patrné dva významnější rozdíly:

1. Věší četnost složek v horní části spektra u Rottenburgh 4205.
2. Náznak lichého a sudého spektra v prvních harmonických složkách.

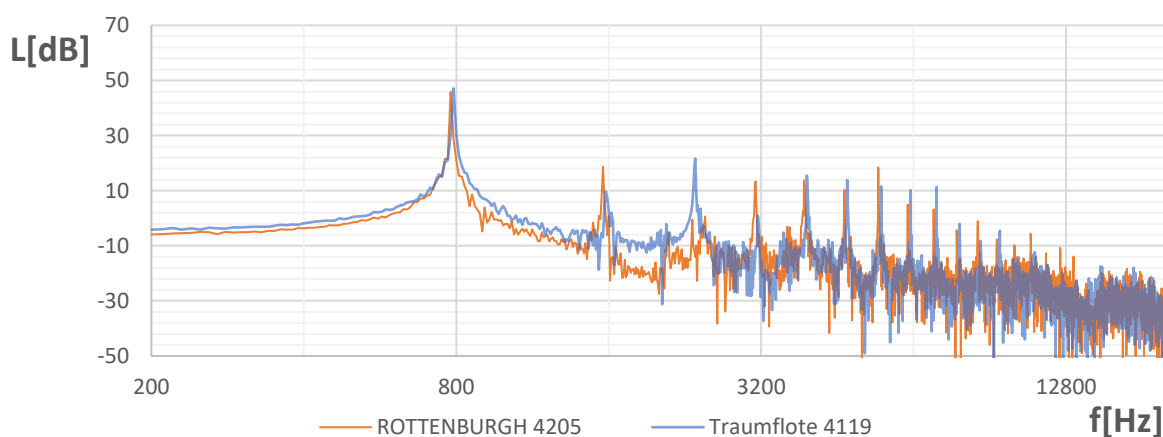
V tónech nahranych na sopránové flétny (c^2 , cis^2 , g^2 , h^2 , d^3) jsou dále hledána další takto navzájem podobná spektra.

Pzn.: Sopránová zobcová flétna je psána o oktávu níže, než zní. Pokud je napsané v notách c^1 , tak při odpovídajícím prstokladu zazní c^2 . Pro názornost jsou v této kapitole popisovány znějící tóny. [1] [2]

Další velmi podobné spektrum odpovídá tónu g^2 . Prstoklad je stejný jako pro c^2 u altové flétny.



obr. č. 5.3 - Prstoklad pro tón g^2 u sopránové zobcové flétny.



Graf 5.11 - Tón g^2

Opět lze pozorovat celková podobnost spektra. Výrazně zde sílí rozdíl č.2. Náznak lichého a sudého spektra v prvních pěti harmonických složkách je výrazný. Zároveň i rozdíl č.1 je stále, i když méně znatelný a v horní části spektra je Rottenburgh stále barevnější. Rozdíly jsou patrné

i v ostatních tónech, ale pro názornost jsou ukázány tyto dva tóny, u kterých jsou nejlépe pozorovatelné.

1. Rozdíl

Jedním z faktorů je především výstupní otvor. Ten u Traumflöte 4119 odpovídá válcovému průměru vnitřní dutiny $d = 15 \text{ mm}$. Zatímco Rottenburgh 4205 se postupně zužuje a na výstupním otvoru je mnohem méně (tento rozměr nebyl změřený). Větším průměrem tedy může utíkat více energie a způsobit malý výskyt harmonických složek ve vyšších pásmech. Zároveň je tento rozdíl v první oktávě méně patrný ve vyšších tónech (tedy se zvyšujícím se počtem odkrytých otvorů), v nichž už spodní část nástroje na barvu zvuku nemá vliv.

Další faktor, který by na toto mohl mít vliv je ostřejší hrana výstupního otvoru u Rottenburgh 4205. Na ostré hraně může zvuková vlna vytvářet difrakce, které v určitém pásmu mohou či nemusí podpořit spektrum.

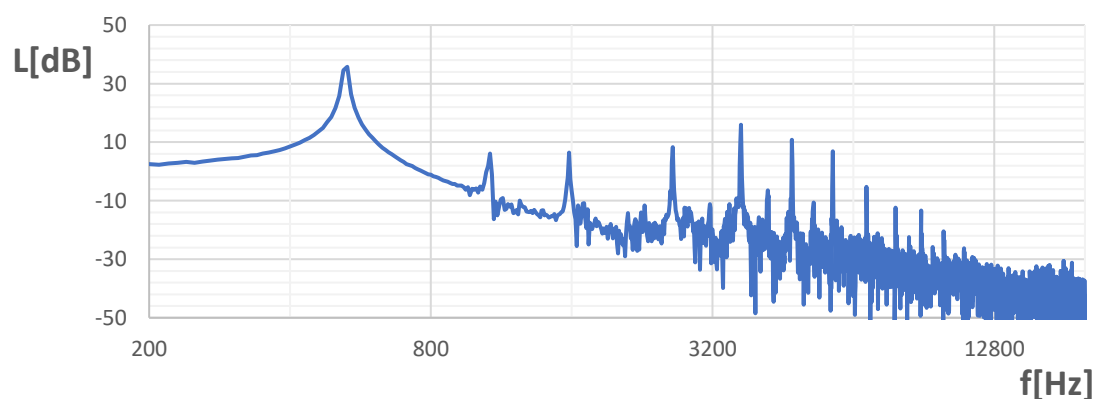
2. Rozdíl

Zde je naprosto zásadní vliv kónického vrtání u Rottenburgh 4205. Traumflöte 4119 je polouzavřená válcová trubice a můžeme tedy očekávat liché spektrum. V kónickém vrtání se s průřezem mění rychlost šíření zvuku a vlivem toho se taková trubice chová jako otevřená a budí i sudé složky. Pokud by bylo proměřeno více modelů s kónickým a válcovým vrtáním, tak lze hledat i detailnější vlivy, jako například styl vrtání otvorů apod.

5.3.2 Plastové

Oba nástroje jsou od stejného výrobce a ze stejného materiálu. Jsou z velmi levné cenové kategorie, přičemž YRS 24B (dále jen 24B) je asi nejrozšířenější sopránová zobcová flétna mezi začínajícími hráči v ZUŠ i obecně. YRS 312BIII (dále jen 312B) je potom o něco dražší verze tohoto nástroje.

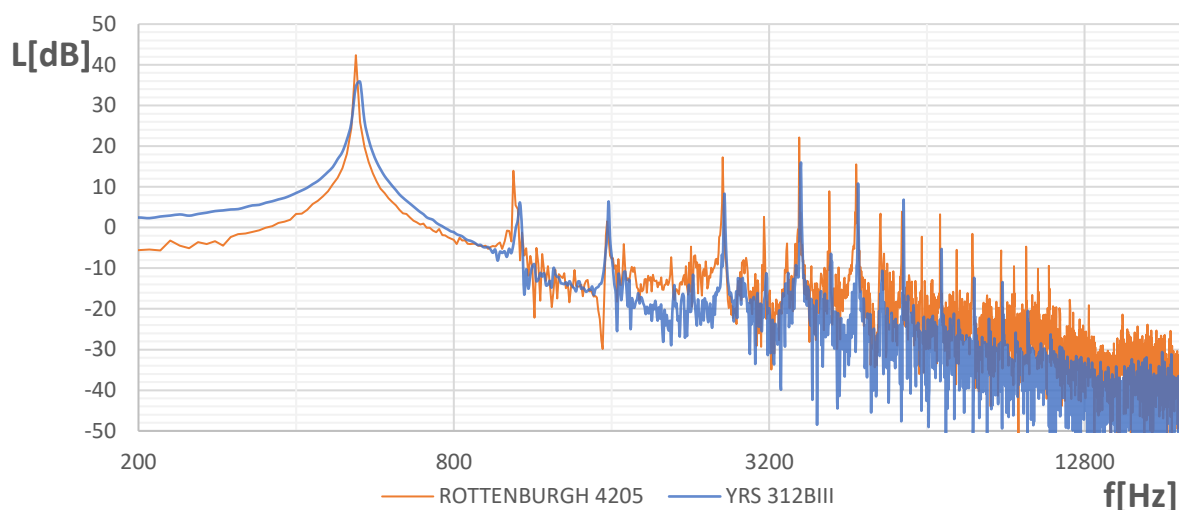
Velice překvapivého měření bylo dosaženo na tónu c^2 . U 312B bylo naměřeno skoro až dokonalé liché spektrum.



Graf 5.12 - Tón c^2 312B

Tuto lichost, i když už ne tak jednoznačně, vykazuje nástroj i v dalších měřených tónech. Nástroj 24B má dosti rozdílnou barvu. Jejich porovnávání je ovšem takřka nemožné. Nástroje byly nahrány v jiné místnosti jiným člověkem a na jiný mikrofon. Takto nejednotné měření nelze v žádném případě považovat za směrodatné. Nástroj 312B je ze sady nástrojů, které pro tuto práci nahrála a poskytla hráčka na zobcové flétny. Zobcová flétna 24B je ovšem moje flétna, která je podobně jako v kapitole o altových flétnách používána na pokusy a porovnání a je využívána její fyzická přítomnost při výzkumu.

Proč vzniká takto jednoznačné liché spektrum u nástroje 312B nelze v aktuálních podmínkách jasně určit. Momentálně není možnost porovnat ani hlouběji zkoumat tento problém, alespoň do takové míry jako v předchozí kapitole. Kde dvě dřevěné flétny, jedna s válcovou dutinou a druhá s kónicky se zužující, změřené ve stejných podmínkách potvrzovaly lichost a sudost právě v závislosti na jejich tvaru. Proč ovšem 312B, která má uvnitř jednoznačně také kónické zúžení najednou vykazuje takto jasné liché spektrum, lze jen spekulovat. Faktem je, že 312B má menší menzuru než Rottenburgh 4205, jiné provedení roztrubu a zároveň má i menší menzuru.



Graf 5.13 - Tón c^1

V grafu 5.14 je 312B porovnaná se dřevěnou (také kónickou flétnou) Rottenburgh 4205. V tomto grafu je jasně vidět komplexnější spektrum u dřevěné flétny oproti lichému spektru flétny plastové.

6. EXOTICKÉ FLÉTNY

V následujících stranách této práce bude pozornost věnována dalším typům fléten. Nejedná se o flétny zobcové, ale o nástroje spíše exotického původu. Celkem byly změřeny tři flétny, z nichž dvě jsou indické a jedna Panova flétna.

Flétna	Materiál	Výrobce
Indická D	Bambus	RYJAZ & SONS
Indická G	Bambus	
Panova Flétna G	Bambus	

Tabulka 6.1 - Seznam měřených fléten v této kapitole.

U těchto nástrojů bylo náročné dohledat jejich původ a popsat jejich vlastnosti přímo, jak to udává výrobce. Nástroje jsou pojmenovány podle nejnižšího tónu, který vydávají.

Indická flétna D – Z dvojice indických fléten je kratší a s menší menzурou (13 mm). Nejnižší vydávaný tón je d^2 .

Indická flétna G – Z dvojice indických fléten je delší a s větší menzурou (17 mm). Nejnižší vydávaný tón je g^1 .

Panova Flétna G – Její rozsah je dvě oktávy. Nejnižší vydávaný tón je g^1 .

Dřevinou je v tomto případě bambus. Jedná se o dřevinu s hustotou od 500-850 kg/m³ a modulem pružnosti od 18-20 GPa. [11] Hodnota hustoty byla u indických fléten upřesněna zvážением hmotnosti a výpočtem objemu. Podobně jako v kapitole 4.1.5.

Pro modul pružnosti $E = 20 \text{ GPa}$:

	Hustota $\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	Akustická konstanta $K_A \text{ [N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$
Indická G	625	9,042
Indická D	726	7,223

Tabulka 6.2 - Spočítané hodnoty hustoty a akustické konstanty ze změřených rozměrů.

Jedná se o píšťaly s válcovým průřezem a u všech o typ polouzavřené trubice. Indická a Panova flétna jsou tedy obě válcové a polouzavřené. Jeden rozdíl mezi nimi ovšem je. U Panovy flétny lze očekávat dokonalejší tvorbu lichého spektra. Jedná se o prostý válcový rezonátor, kde vzduch je vháněn přímo otevřeným koncem. Vzduch vstupuje do dutiny přesně v místě tlakového uzlu. U indické flétny je podobně jako u příčné flétny vzduch vháněn otvorem, který je vyvrtán poblíž uzavřeného konce. Stejně je umístěno labium u polouzavřeného konce na

zobcové flétně. Stejně tak byl vyvrtán otvor v experimentálních trubicích (kapitola 4) v této práci.

6.1.1 Spektra základních tónů

Byla nahrána spektra základních tónů, tedy tónů kdy jsou všechny otvory zakryté. U panovy flétny se jedná o nejnižší (největší trubici) tón. Jak se tedy u těchto nástrojů projevuje teorie z kapitoly 3.

Nejdříve krátce něco k rozměrům nástrojů. Pokud jsou zakryty všechny otvory, tak vzdušný sloupec má délku celé vnitřní dutiny. Jedna indická flétna pak vydává tón D a druhá pak tón G. U Panovy flétny odpovídá délka sloupce příslušné trubici. V následující tabulce je na Panovu flétnu hrán nejnižší tón, na Indickou flétnu G také nejnižší tón (všechny dírký zakryté) a na indické flétně D jsou první tři dírký odkryté, aby vznikl také tón G.

	Délka vzdušného sloupce [mm]	Frekvence změřeného fundamentu [Hz]
Indická D	180	610
Indická G	440	370
Panova Flétna	220	390

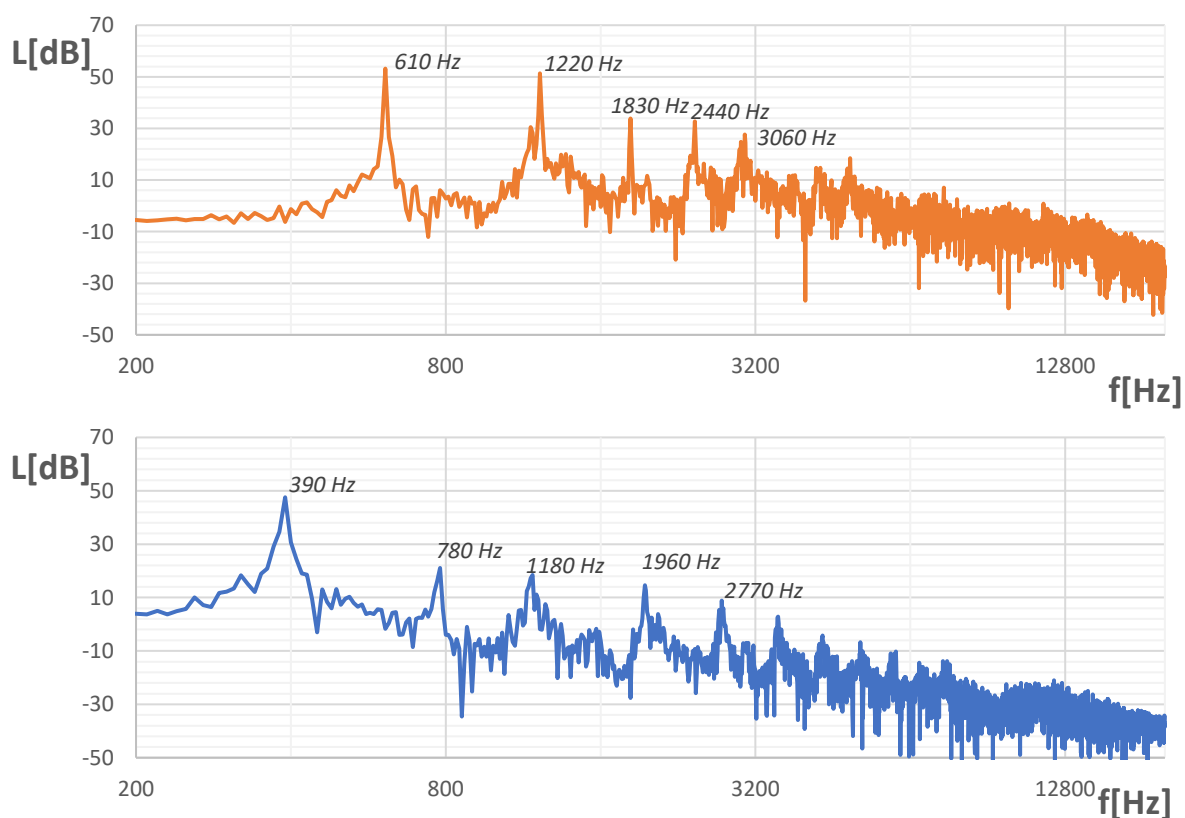
Tabulka 6.3 - Tabulka délek vzdušného sloupce a změřených fundamentů při těchto délkách pro tóny G u jednotlivých nástrojů.

Panova flétna hraje stejný tón g^1 jako Indická G, ale s poloviční délkou vzdušného sloupce a Indická D s délkou sloupce přibližně odpovídající délce u panovy flétny hraje tón g^2 o oktávu výše. Skutečnost, že Indická flétna D hraje tón o oktávu výše než Panova flétna s (přibližně) stejnou délkou vzdušného sloupce napovídá, že indické flétny vykazují chování otevřené trubice úplně stejně jako zobcová flétna, přičemž mají tvar polouzavřené trubice. Stejně tak dvakrát delší Indická flétna G by měla za polouzavřeného stavu hrát ještě o oktávu níže, ale zní na podobné frekvenci jako panova flétna s poloviční délkou trubice. [4]

6.1.2 Spektra

POLOUZAVŘENÁ									
MODY		1	3	5	7	9	11		
Panova flétna	Frekvence [Hz]	390	1169	1949	2728	3508	4288		
OTEVŘENÁ									
MODY		1	2	3	4	5	6	7	8
Indická flétna D	Frekvence [Hz]	635	1270	1906	2541	3176	3811	4446	5081
Indická flétna G	Frekvence [Hz]	390	780	1169	1559	1949	2339	2728	3118

Tabulka 6.4 - Tabulka vypočítaných harmonických frekvencí pro jednotlivé flétny. Pro panovu flétnu jako polouzavřená trubice a pro indické flétny jako otevřená trubice.

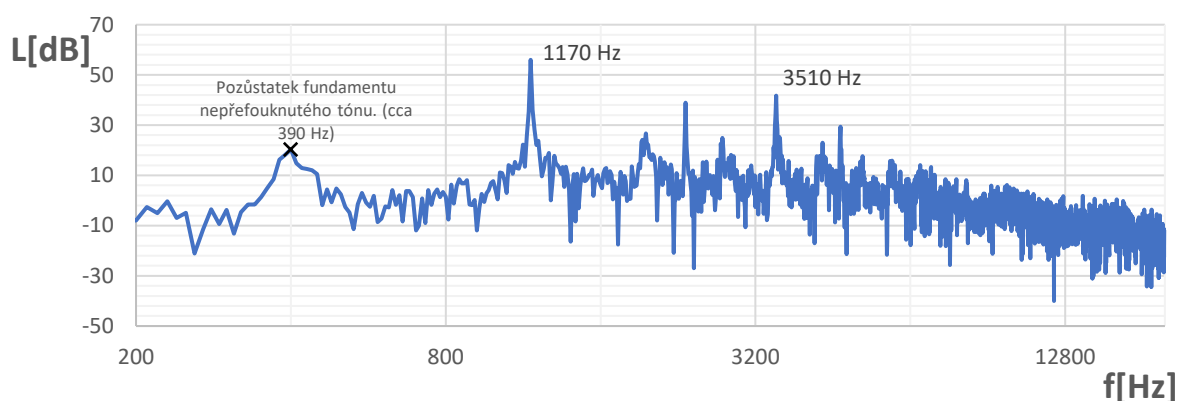


Graf 6.1 - Spektra Panovy flétny (modře tón g^1) a Indické flétny D (oranžově tón g^2).

V grafu 6.1 jsou vypsány hodnoty frekvence pěti prvních harmonických a jak je vidět, tak odpovídají spektrům spočítaným v tabulce 6.4. Ve spektru panovy flétny se ovšem objevuje sudá 2. harmonická (780 Hz). Byly nahrány ještě tóny d^2 a e^2 , tedy kvinta a sexta k tónu g^1 a ve

spektrech těchto tónů se už tato složka neobjevuje. Není jasné z jakého důvodu je tato složka v této nízké poloze přítomna, ale například u zobcových fléten je také v rozmezí 1-5 harmonické složky občas v nižších polohách znatelná sudost, která postupně mizí.

Úplnou tečkou za touto problematikou je charakteristika přefouknuté panovy flétny. Pokud se panova flétna vskutku chová jako polouzavřená trubice, tak se po přefouknutí nenaladí na mód druhé harmonické (oktáva), ale na třetí harmonickou (duodecima = oktáva + kvinta). Takže pokud přefoukneme trubici vydávající tón g^1 o frekvenci $f_{g^1} = 390 \text{ Hz}$ ozve se tón o frekvenci $f = f_{g^1} \cdot 3 = 390 \cdot 3 = 1170 \text{ Hz}$. [2] [4] [1]



Graf 6.2 - Spektrum přefouknuté trubice G na panově flétně.

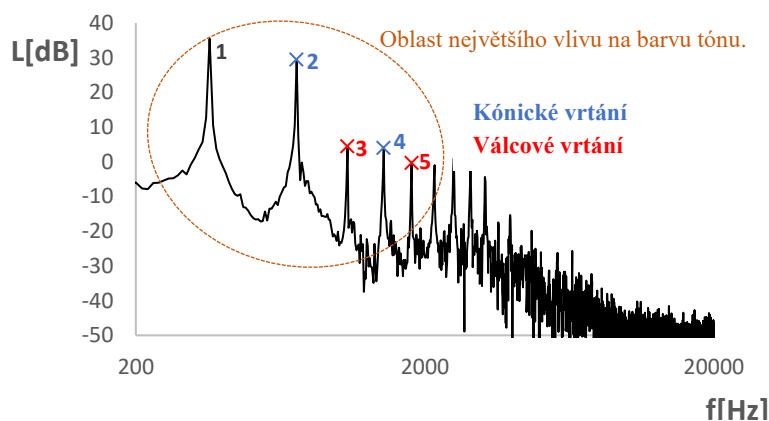
Podle grafu 6.2 vychází změřené spektrum naprosto přesně podle předchozí úvahy. Při hraní na nástroj jako je panova flétna se při přefouknutí těžko zbavuje rezonance nepřefouknutého tónu a velice často se ve spektru objeví. Dále je lze ve spektru pozorovat další lichou složku na frekvenci 3510 Hz a stále lehce působící sudost, která byla okomentována výše.

7. ZÁVĚREČNÉ SHRnutí

V této práci byly zkoumány vlastnosti, které mají vliv na tvorbu tónu v zobcové flétně. Byly měřeny samotné zobcové flétny, ale i válcové vzorky, ve kterých byl zkoumán samotný vzdušný válec. Změřeny byly i některé další exotické flétny, přesněji dvě indické a jedna panova flétna. V důsledku vládních nařízení ohledně epidemiologické situace, byly omezeny možnosti měření a především možnost uskutečnit měření v bezdrazové místnosti. Dále byla práce omezena skutečností, že měřené flétny (zobcové) nebyly poskytnuty fyzicky. Nahrané vzorky byly zaslané po internetu a absence jednotlivých fléten během výzkumu velmi často komplikovala práci. Z toho důvodu je velmi často prováděno měření a analýza na jiných nástrojích či vzorcích, které byly během práce fyzicky k dispozici.

ZOBCOVÁ FLÉTNA

- Její tvar odpovídá uzavřené trubici, ale její chování a princip tvorby zvuku je srovnatelný s retnou píšťalou a chování v ústech píšťaly (u flény labium) ovlivňuje tvorbu a umístění tlakových a rychlostních uzlů uvnitř trubice a **zobcová flétna se ve výsledku chová spíše jako otevřená trubice**.
- Barva tónu je ovlivněna hlavně prvními třemi až čtyřmi složkami. Tyto jsou většinou nejsilnější.



obr. č. 7.1 - Spektrum tónu hraného na zobcovou flétu (s kónickým vrtáním).

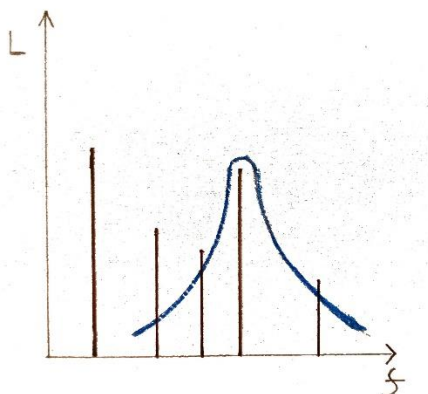
- Charakter prvních čtyř složek značně ovlivňuje vrtání trubice. Kónické vrtání podle obrázku č. 7.1 přidává **sudost** a válcové zase **lichost**. (viz 5.3.1).
- Spektrum je z vrchu omezené v závislosti na velikosti menzury, ta vytváří filtr dolní propusti, jejíž mezní kmitočet je **tím větší, čím menší je menzura**. (viz 4.1.4.)
- Barvu dále ovlivňují odkryté dírký a charakter prstokladů.

Materiál zobcové flétny je dalším nepominutelným faktorem, který ovlivňuje spektrální skladbu tónů. Každý materiál má jiné rezonanční vlastnosti. Tyto vlastnosti byly v této práci pro každý materiál spočítány a v této souvislosti byly i hledány rozdíly ve spektrech, které napovídaly vlivu materiálu na barvu. Materiál také může podpořit spektrum pouze za určitých podmínek. U plastové altové flétny byla podpořena určitá frekvence, která byla výraznější pouze z některých tónů. Zároveň pak u některých vyšších tónů může být vnímatelná celková větší hlasitost, pokud tato frekvence odpovídá fundamentu.

Materiál	Akustická Konstanta
ABS	1,139
African Blackwood (Grenadil)	2,960
Palisandr	4,520
Hrušeň	4,873
Růžové Dřevo	5,026
Bambus	7,223 - 9,042

Tabulka 7.1 - Srovnání ak. konstant všech materiálů.

V této práci bylo několikrát zjištěno, že materiál může podporovat spektrum v určitých oblastech. Pokud má v určitém místě ve spektru rezonanci a zároveň se zde nachází oblast vyšších harmonických, tak bylo možné pozorovat v těchto pásmech nárůsty úrovní ve spektru.



obr. č. 7.2 - Znázornění posilování spektra rezonancí materiálu. Rezonance materiálu (modře) a spektrum (černě).

Co se týče analýzy vlivů rozdílných hodnot akustických konstant materiálů jednotlivých fléten, tak v této práci tato závislost nebyla do velké míry dána do souvislostí. Velkou komplikací v tomto měření byla absence výrazně rozdílných typů materiálu (s výrazně rozdílnými K_A). V kapitole o altových flétnách jsou sice skoro totožné flétny s různými materiály (Grenadil, palisandr, růžové dřevo), ale jejich mechanické vlastnosti jsou dosti podobné. Zároveň zde byly nalezeny i určité nejasnosti. Spektrum flétny z grenadilu se zdálo

bohatší než spektrum z palisandru, to vykazovalo nejchudší spektrum navzdory tomu, že má vyšší akustickou konstantu. Dále bylo pozorováno několik podpůrných vlastností u plastových vzorků, kde vychází akustická konstanta ještě nižší. To jen podporuje fakt, že materiál podporuje spektrum jen za určitých podmínek. U plastových nástrojů bylo vícekrát pozorováno podporování spektra materiálem, i když byla u tohoto nástroje akustická konstanta změřena jako velmi malá ($K_A = 1,139$ pro ABS). To by se s velkou pravděpodobností dalo přisuzovat anizotropii (dřeva) a izotropii (plastu). Tato problematika musí být ovšem více dopodrobna zkoumána.

V závěru práce jsou proměřeny tři exotické flétny. Je zde ukázáno, že Panova flétna jakožto obyčejný rezonátor v podobě polouzavřené trubice odpovídá přesně teoretických výpočtům vyšších harmonických a zároveň jí lze přefouknout do duodecimy a ne do oktávy, jako je tomu u otevřené trubice. U indických fléten bylo zase ukázáno, že i když se na první pohled jedná o polouzavřenou trubici, tak výsledné spektrum odpovídá chování otevřené trubice (stejně jako u zobcových fléten).

V této práci byly odhaleny prvky, které ovlivňují barvu zvuku zobcové flény a je potřeba se jim věnovat mnohem hlouběji a více dopodrobna. Je potřeba provést přesnější a důkladnější měření a analýzy a přenést je do laboratorních podmínek. Zároveň je nutné více porovnávat co nejvíce stejných vlastností s pouze jednou vlastností odlišnou a sledovat její následek. Více odlišných vlastností působí mnoho rozdílů ve spektru a zmatek. Tato práce poukázala mnoho směrů a problémů, které je potřeba v budoucnu vyřešit, ale zároveň vytvořila pevný základ o který se lze opřít.

7.1 Srovnávací tabulky

Závěrem této práce jsou srovnávací tabulky, které mají v sobě uvedené všechny prvky a flétny, které byly zkoumány a popisovány postupně podle kapitol a zanechává nad nimi krátký komentář.

<i>Prvek</i>	<i>Komentář</i>	<i>Sudost/Lichost</i>	<i>Formanty</i>	<i>Další funkce</i>
Umístění vzduchového otvoru. <u>4.1.2</u>	Místo vstupujícího proudu vzduchu velmi ovlivňuje poměry vlnění v trubici. Je důležité, aby vzduch vstupoval do trubice pokud možno v místě tlakového uzlu. Jinak dojde k rozladění a posuvu uzlu a trubice vydává odlišný tón, než se předpokládalo.	ZÁVISÍ NA PŘESNÉM UMÍSTĚNÍ OTVORU		VÝRAZNĚ POSOUVÁ LADĚNÍ
<i>Prvek</i>	<i>Komentář</i>	<i>Sudost/Lichost</i>	<i>Formanty</i>	<i>Další funkce</i>
Menzura <u>4.1.4</u>	Ovlivňuje celkovou tvorbu vyšších harmonických. Čím větší menzura, tím menší impedance prostředí a menší výskyt harmonických. Zároveň bylo popsáno, že funguje jako filtr typu dolní propust v závislosti na její velikosti. Vlnové délky malých rozměrů unikají otvorem pryč a nevytvářejí rezonance. Trubice č. 2 s větší menzurou vykazovala ve spektru šumový charakter níže, než Trubice č.3 s menší menzurou.	NEOVLIVŇUJE	PŘIDÁVÁ ČI UBÍRÁ	DOLNÍ PROPUST

<i>Prvek</i>	<i>Komentář</i>	<i>Sudost/Lichost</i>	<i>Formanty</i>	<i>Další funkce</i>
Vliv Prstokladů <u>5.2.4</u>	<p>Při odkrývání otvorů na nástroji klesá impedance uvnitř nástroje (energie odchází odkrytými otvory). Více zavřené hmaty mají bohatší spektrum.</p> <p>V této problematice byla změřena pouze jedna flétna. Nelze tedy dělat jasné závěry. Závislost není lineární, ale odkrývání děr určitě napomáhá tvorbě formantů.</p>	NEOVLIVŇUJE	VÝRAZNĚ OVLIVŇUJE	-
<i>Prvek</i>	<i>Komentář</i>	<i>Sudost/Lichost</i>	<i>Formanty</i>	<i>Další funkce</i>
Odkryté otvory <u>5.2.5</u>	Zakrytí otvorů (i výstupního) má za následek zmenšení akustické délky nástroje. To znamená posuv všech uzlů vlnění v nástroji a změnu ladění tónu.	NEMÁ VLIV	OVLIVŇUJE	POSUV LADĚNÍ
<i>Prvek</i>	<i>Komentář</i>	<i>Sudost/Lichost</i>	<i>Formanty</i>	<i>Další funkce</i>
Kónické vrtání <u>5.3.1</u>	Flétna s kónickým vrtáním byla porovnána s flétnou válcového průřezu. V prvních čtyřech harmonických byla pozorována lichost a sudost. Zároveň v zužujícím se průměru vzniká postupně větší impedance a to podporuje vznik formantů ve vysokých částech pásma oproti válcovému vrtání, kde tyto frekvence naopak vymizí.	SUDOST I KOMPLEXNOST	PŘIDÁVÁ	-
Válcové vrtání <u>5.3.1</u>		LICHOST	UBÍRÁ	-

Tabulka 7.2 - Srovnávací tabulka.

ALTOVÉ FLÉTNY			
<i>Flétna</i>	<i>Materiál</i>	<i>K_A</i>	<i>Komentář</i>
Rottenburgh 4305	Palisandr	4,52	Mezi alt. Flétnami má nejchudší spektrum. Sdílí společný podobný formant v okolí 3 kHz s ostatními altovými flétnami z této práce.
Rottenburgh 4307	Grenadil	2,96	I přes nejmenší akustickou konstantu vykazuje bohatší spektrum srovnatelné s Rottenburgh 4308.
Rottenburgh 4308	Růžové dřevo	5,026	Spektrum velmi podobné s modelem 4307.
SOPRÁNOVÉ FLÉTNY			
<i>Flétna</i>	<i>Materiál</i>	<i>K_A</i>	<i>Komentář</i>
YRS-312BIII	ABS	1,139	I přes kónické vrtání vykazuje skoro dokonale liché spektrum.
Rottenburgh 4205	Palisandr	4,52	V porovnání s Adri's Traumflöte 4119 vykazuje v prvních 4-5 harmonických liché spektrum. Dále je ve spektru komplexní.
Adri's Traumflöte 4119	Hrušeň	4,873	V porovnání s Rottenburgh 4205 vykazuje v prvních 4-5 harmonických liché spektrum. Dále je ve spektru komplexní.
EXOTICKÉ FLÉTNY			
<i>Flétna</i>	<i>Materiál</i>	<i>K_A</i>	<i>Komentář</i>
Indická flétna D	Bambus	7,223	Oproti panově flétně má komplexní spektrum a vyšší harmonické jsou celkově výraznější.
Panova flétna	Bambus	-	Vykazuje chování polouzavřené trubice a její spektrum je liché. V nižších polohách se objevuje sudá druhá harmonická.

Tabulka 7.3 - Tabulka fléten.

LITERATURA

- [1] **flauto-dolce**. Zobcové flétny. *flauto-dolce*. [Online] [Citace: 17. 03 2021.] <http://flauto-dolce.wz.cz/druhy.htm>.
- [2] **SYROVÝ, Václav**. *Hudební akustika*. Praha : Akademie muzických umění, 2013. 978-80-7331-297-8.
- [3] **Wikipedie**. Zobcová Flétna. *Wikipedie*. [Online] 2021. [Citace: 15. 04 2021.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Zobcov%C3%A1_fl%C3%A9tna.
- [4] **Syrový, Václav**. *Kapitoly o varhanách*. Praha : Akademie muzických umění, 2004. 80-7331-009-0.
- [5] **Suchánek, Bc. Tomáš**. *Analýza spektra klarinetů od různých výrobců*. 2019.
- [6] **POŽGAJ, Alexander**. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava : PŘÍRODA a.s., 1997. 9788007006003.
- [7] **Leinveber, Jan a Vávra, Pavel**. *Strojírenské tabulky*. Praha : Albra, 2008. 978-80-7361-051-7.
- [8] **Dorran, David**. Plotting Frequency Spectrum using Matlab. *dadoran.wordpress*. [Online] 20. 02 2014. [Citace: 12. 11 2020.] <https://dadorran.wordpress.com/2014/02/20/plotting-frequency-spectrum-using-matlab/>.
- [9] **FV Plast, a.s.** *Technický manuál*. Čelákovice : FV Plast, 2018. CZ 10-2018.
- [10] **Wavin Osma**. *Odpadní trubky a tvarovky*. Kostelec nad Labem : Wavin Osma, 2012.
- [11] **Meier, Eric**. Wood Database. *Wood Database*. [Online] 2008-2021. <https://www.wood-database.com/>.
- [12] **Garcia, Francisco**. *Acquisition and study of blowing pressure*. [Diplomová Práce] Barcelona : autor neznámý, 2010.
- [13] **Blanc, François, a další**. *Scaling of Flute-Like Instruments: An Analysis from the Point Of View of the Hydrodynamic Instability of the Jet*. 2010.
- [14] **doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.** *Elektroakustika*. [Skripta] Brno : Vysoké učení technické v Brně.

[15] **Wegst, Ulrike G.K.** Wood For Sound. [Online] 01. 10 2006.
<https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439>.

Seznam symbolů a zkratek

DAW	Digital audio Workstation.
FFT	Fast fourier transform.
LPC	Linear Predictive Coding.
ADSR	Attack, Decay, Sustain, Release.
HT	Označení vodovodních odpadních trubek.
PPR	Random Polypropylen – Označení vodovodních trubek pro pitnou vodu.
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren.